



TUGAS AKHIR - RE 141581

KOMBINASI PROSES ELEKTRODIALISIS DAN OKSIDASI ELEKTROKIMIA SEBAGAI ALTERNATIF PRA-PENGOLAHAN LINDI

**PUTU PUTRI INDIRA SARI
3313100104**

**Dosen Pembimbing
Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



TUGAS AKHIR - RE 141581

KOMBINASI PROSES ELEKTRODIALISIS DAN OKSIDASI ELEKTROKIMIA SEBAGAI ALTERNATIF PRA-PENGOLAHAN LINDI

**PUTU PUTRI INDIRA SARI
3313100104**

**Dosen Pembimbing
Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D.**

**DEPARTEMEN TEKNIK LINGKUNGAN
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**



FINAL PROJECT - RE 141581

COMBINATION OF ELECTRODIALYSIS AND ELECTROCHEMICAL OXIDATION PROCESS AS A LANDFILL LEACHATE PRE-TREATMENT

**PUTU PUTRI INDIRA SARI
3313100104**

**Supervisor
Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL ENGINEERING
Faculty of Civil Engineering and Planning
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

LEMBAR PENGESAHAN

KOMBINASI PROSES ELEKTRODIALISIS DAN OKSIDASI ELEKTROKIMIA SEBAGAI ALTERNATIF PRA-PENGOLAHAN LINDI

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

PUTU PUTRI INDIRA SARI

NRP 3313100104

Disetujui oleh Pembimbing Tugas Akhir :



Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil., Ph.D.

NIP. 19820804 200501 1 001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

KOMBINASI PROSES ELEKTRODIALISIS DAN OKSIDASI ELEKTROKIMIA SEBAGAI ALTERNATIF PRA-PENGOLAHAN LINDI

Nama : Putu Putri Indira Sari
NRP : 3313100104
Departemen : Teknik Lingkungan
Dosen Pembimbing : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT.,
M.Phil., Ph.D.

ABSTRAK

Proses oksidasi elektrokimia pada pengolahan lindi dilakukan untuk menyisihkan polutan organik sedangkan elektrodialisis untuk memisahkan ion-ion positif dan negatif yang dalam hal ini dimanfaatkan untuk *recovery* nutrisi nitrogen (N) dan fosfor (P). Faktor pH berpengaruh pada evolusi persenyawaan klorin sebagai mediator pada oksidasi tidak langsung sedangkan penambahan NaCl bertujuan untuk menyediakan klorin sebagai mediator.

Penelitian menggunakan reaktor akrilik dengan anoda karbon dan katoda *stainless steel*. Reaktor terdiri dari tiga kompartemen yang dipisahkan oleh membran anion dan kation. Pada kompartemen yang terdapat elektroda terjadi penyisihan polutan organik lindi sedangkan pada kompartemen yang berisi *aquadest* menerima perpindahan ion NH_4^+ dan PO_4^{3-} . Sistem yang digunakan adalah *batch* dan dioperasikan selama 12 jam dengan lima titik waktu pengambilan sampel. Elektroda dialiri arus listrik *Direct Current* (DC) dengan arus 0,25 A. Variasi yang digunakan adalah penambahan NaCl serta variasi pH awal proses yaitu 5,5; pH asli lindi dan 8,5. Analisis parameter utama meliputi COD, TDS, pH, Cl^- , NH_4^+ dan total fosfat.

Dari keseluruhan uji reaktor, penyisihan massa paling efektif adalah pada variasi penambahan 2 gram NaCl L^{-1} . Penyisihan COD paling tinggi terjadi pada variasi pH Awal Proses 8,5 dan yaitu sebesar 77,93% ($0,991 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$). Penyisihan TDS paling tinggi pada variasi pH awal proses 5,5 yaitu sebesar

60,30% ($0,573 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$) dan klorida sebesar (76,86%) $0,701 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$. Penyisihan ammonium paling tinggi terjadi pada uji dengan variasi pH asli lindi yaitu sebesar 84,09% ($0,466 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$) dan untuk total fosfat tercapai pada variasi pH awal proses 8,5 sebesar 90,16% ($0,0121 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$).

Kata Kunci: elektrodialisis, elektrosorpsi, lindi, oksidasi elektrokimia, nutrien

COMBINATION OF ELECTRODIALYSIS AND ELECTROCHEMICAL OXIDATION PROCESS AS A LANDFILL LEACHATE PRE-TREATMENT

Name : Putu Putri Indira Sari
Register Number : 3313100104
Department : Environmental Engineering
Supervisor : Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil.,
Ph.D.

ABSTRACT

In leachate treatment process electrochemical oxidation was applied to remove organic contaminants meanwhile electrodialysis played role on ionic transfer through membranes in which used as the nutrient (nitrogen and phosphorus) recovery. Some factors affecting both processes are including pH, which affects the chlorine evolution to provide oxidizing agent and the amount of chloride ions as the mediator of indirect oxidation.

A laboratory-scale electrochemical reactor was designed using commercially available carbon anode and stainless steel cathode to create a triple-chamber reactor separated by anion and cation exchange membranes. Organic pollutants removal took place in leachate compartment with electrodes that provide oxidation meanwhile aquadest compartment received NH_4^+ and PO_4^{3-} ions transferred from leachate compartment. The batch processes were performed in 12-hour operational time at constant supplied current density of 0.25 A and evaluated by means of pH and salinity effects. Different variation of 1 g L⁻¹, 2 g L⁻¹ and without NaCl addition was applied. pH varied as unadjusted, adjusted to 5.5 and 8.5 in the beginning of each variation. Main parameters analyzed were including COD, TDS, pH, Cl⁻, NH_4^+ and total phosphate.

As a result, operation with the addition of 2 g L⁻¹ gave the best performance in removal efficiency of all parameters. The best COD removal attained 77.93% (0.991 g W⁻¹h⁻¹) at pH 8.5. Removal of 60.30% (0.573 g W⁻¹h⁻¹) TDS and (76.86%) 0.701 g

$\text{W}^{-1}\text{h}^{-1}$ Cl^{-} was attained at pH 5.5. Removal of ammonium reached 84.09% ($0.466 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$) at the unadjusted pH and 90,16% ($0.0121 \text{ g W}^{-1}\text{h}^{-1}$) was removed from total phosphate at pH 8.5.

Keywords: electrodialysis, electrosorption, electrochemical oxidation, leachate, nutrient

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya ucapkan pada Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya saya dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul "Kombinasi Proses Elektrodialisis dan Okidasi Elektrokimia sebagai Alternatif Pra-pengolahan Lindi".

Atas bimbingan dan pengarahan yang telah diberikan hingga terselesaikannya laporan tugas akhir ini, saya menyampaikan terima kasih kepada,

1. Bapak Arseto Yekti Bagastyo, ST., MT., M.Phil, Ph.D. selaku dosen pembimbing tugas akhir, terima kasih atas motivasi, kesabaran serta bimbingan yang telah diberikan.
2. Ibu I D A A Warmadewanthi, ST., MT., Ph.D., Ibu Dr. Ir. Ellina S. Pandebesie, MT., Bapak Welly Herumurti, ST., M.Sc. dan Bapak Alfian Purnomo, ST., MT. selaku dosen penguji tugas akhir, terima kasih atas saran serta bimbingannya.
3. Pemerintah Kabupaten Gresik dan pengelola Tempat Pemrosesan Akhir Ngipik, Gresik, Jawa Timur.
4. Keluarga yang selalu memberikan dukungan dan doa untuk kelancaran tugas akhir saya.
5. Bapak Hadi Sutrisno dan Ibu Mery selaku laboran Teknik Lingkungan yang senantiasa membantu dan memfasilitasi ketika di laboratorium.
6. Teman-teman angkatan 2013, 2014 dan 2015 yang selalu memberikan semangat dan siap dalam membantu.

Saya menyadari masih banyak kekurangan dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Oleh karena itu saya menerima saran agar penulisan laporan tugas akhir ini menjadi lebih baik. Semoga tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| ABSTRAK..... | i |
| ABSTRACT | iii |
| KATA PENGANTAR | v |
| DAFTAR ISI..... | vii |
| DAFTAR GAMBAR | ix |
| DAFTAR TABEL..... | xiii |
| DAFTAR LAMPIRAN | xv |
| BAB 1 PENDAHULUAN..... | 1 |
| 1.1 Latar Belakang..... | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Ruang Lingkup Penelitian..... | 4 |
| 1.5 Manfaat Penelitian..... | 4 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA..... | 5 |
| 2.1 Karakteristik Lindi..... | 5 |
| 2.1.1 Karakteristik Umum Lindi..... | 5 |
| 2.1.2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik..... | 6 |
| 2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia..... | 7 |
| 2.3 Oksidasi Elektrokimia | 7 |
| 2.3.1 Mekanisme Oksidasi Elektrokimia..... | 8 |
| 2.3.2 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Oksidasi Elektrokimia | 10 |
| 2.4 Elektrodialisis | 13 |
| 2.4.1 Mekanisme Elektrodialisis | 13 |
| 2.4.2 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Elektrodialisis..... | 17 |

| | |
|---|-----|
| 2.3 Perhitungan Efisiensi Proses | 21 |
| 2.3.1 Hukum Faraday I | 21 |
| 2.3.2 Hukum Coulomb..... | 22 |
| 2.3.3 Konsumsi Energi Spesifik..... | 22 |
| 2.4 Penelitian Terdahulu | 23 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN..... | 25 |
| 3.1 Deskripsi Umum | 25 |
| 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian | 25 |
| 3.3 Kerangka Penelitian..... | 25 |
| BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN | 41 |
| 4.1. Penelitian Pendahuluan | 41 |
| 4.1.1 Karakteristik Awal Lindi | 41 |
| 4.1.2 Penentuan Debit, Arus Listrik dan Durasi Operasi .. | 41 |
| 4.2 Penelitian Utama | 45 |
| 4.2.1. Hasil Proses Elektrodialisis | 46 |
| 4.2.2 Hasil Proses Oksidasi Elektrokimia | 80 |
| 4.3 Konsumsi Energi Spesifik Proses..... | 90 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN | 98 |
| 5.1 Kesimpulan | 99 |
| 5.2 Saran | 99 |
| DAFTAR PUSTAKA | 101 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|--------------|--|----|
| Gambar 2. 1 | Proses Oksidasi Elektrokimia..... | 8 |
| Gambar 2. 2 | Mekanisme Oksidasi..... | 10 |
| Gambar 2. 3 | Mekanisme Oksidasi pada Anoda | 10 |
| Gambar 2. 4 | Persenyawaan Klorin Berdasarkan pH | 13 |
| Gambar 2. 5 | Proses Elektrodialisis..... | 14 |
| Gambar 2. 6 | Persenyawaan Ammonium Berdasarkan pH | 16 |
| Gambar 2. 7 | Nilai Oxygen Evolution Overpotential dari Beberapa Material Elektroda..... | 18 |
| Gambar 3. 1 | Kerangka Penelitian..... | 27 |
| Gambar 3. 2 | Diagram Sistem Elektrodialisis..... | 33 |
| Gambar 3. 3 | Gambar Reaktor | 34 |
| Gambar 4. 1 | Penyisihan COD Penelitian Pendahuluan..... | 42 |
| Gambar 4. 2 | Penyisihan TDS Penelitian Pendahuluan | 43 |
| Gambar 4. 3 | Penyisihan Salinitas Penelitian Pendahuluan | 44 |
| Gambar 4. 4 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi | 47 |
| Gambar 4. 5 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 47 |
| Gambar 4. 6 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH..... | 48 |
| Gambar 4. 7 | Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada | 49 |
| Gambar 4. 8 | Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 50 |
| Gambar 4. 9 | Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 50 |
| Gambar 4. 10 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi | 52 |
| Gambar 4. 11 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi | 52 |
| Gambar 4. 12 | Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi | 53 |
| Gambar 4. 13 | Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl | 54 |
| Gambar 4. 14 | Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 54 |

| | |
|---|----|
| Gambar 4. 15 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 55 |
| Gambar 4. 16 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi..... | 56 |
| Gambar 4. 17 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi..... | 56 |
| Gambar 4. 18 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi..... | 57 |
| Gambar 4. 19 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada..... | 58 |
| Gambar 4. 20 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 58 |
| Gambar 4. 21 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 59 |
| Gambar 4. 22 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi60 | |
| Gambar 4. 23 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan | 61 |
| Gambar 4. 24 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan | 61 |
| Gambar 4. 25 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl | 62 |
| Gambar 4. 26 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 62 |
| Gambar 4. 27 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 63 |
| Gambar 4. 28 Penyisihan Ammonium pada Variasi | 64 |
| Gambar 4. 29 Penyisihan Ammonium pada Variasi | 64 |
| Gambar 4. 30 Penyisihan Ammonium pada Variasi | 65 |
| Gambar 4. 31 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl..... | 66 |
| Gambar 4. 33 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 66 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4. 32 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 66 |
| Gambar 4. 34 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 | 67 |
| Gambar 4. 35 Penyisihan Ammonium pada Variasi | 68 |
| Gambar 4. 36 Penyisihan Ammonium pada Variasi | 68 |
| Gambar 4. 37 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl | 69 |
| Gambar 4. 38 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 70 |
| Gambar 4. 39 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 70 |
| Gambar 4. 40 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi | 72 |
| Gambar 4. 41 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi | 72 |
| Gambar 4. 42 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan | 73 |
| Gambar 4. 43 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Tanpa Penambahan NaCl | 73 |
| Gambar 4. 44 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 74 |
| Gambar 4. 45 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 74 |
| Gambar 4. 46 PenyisihanTotal Fosfat pada Variasi | 75 |
| Gambar 4. 47 PenyisihanTotal Fosfat pada Variasi | 76 |
| Gambar 4. 48 PenyisihanTotal Fosfat pada Variasi | 76 |
| Gambar 4. 49 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl | 77 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4. 50 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 77 |
| Gambar 4. 51 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 78 |
| Gambar 4. 52 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi | 79 |
| Gambar 4. 53 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi | 79 |
| Gambar 4. 54 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi | 80 |
| Gambar 4. 57 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 81 |
| Gambar 4. 55 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl | 81 |
| Gambar 4. 56 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 81 |
| Gambar 4. 58 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl | 83 |
| Gambar 4. 59 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi dan . | 83 |
| Gambar 4. 60 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi dan . | 84 |
| Gambar 4. 61 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 | 85 |
| Gambar 4. 62 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 | 85 |
| Gambar 4. 63 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 | 86 |
| Gambar 4. 64 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 | 87 |
| Gambar 4. 65 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 | 87 |
| Gambar 4. 66 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 | 88 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2. 1 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA | 6 |
| Tabel 2. 2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik Berdasarkan Musim | 6 |
| Tabel 2. 3 Baku Mutu Lindi Indonesia | 7 |
| Tabel 2. 4 Bentuk spesies ion asam fosfat berdasarkan pH.... | 17 |
| Tabel 2. 5 Mobilitas spesies ion asam fosfat berdasarkan pH. | 17 |
| Tabel 2. 6 Nilai Oxygen Evolution Overpotential dari Beberapa Material Elektroda | 18 |
| Tabel 2. 7 Perbandingan Proses Elektrodialisis dengan <i>Reverse Osmosis</i> | 21 |
| Tabel 2. 8 Penelitian Terdahulu..... | 23 |
| Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter | 30 |
| Tabel 3. 2 Spesifikasi Membran yang Digunakan..... | 31 |
| Tabel 3. 3 Variasi Sampel Hasil Penelitian..... | 35 |
| Tabel 3. 4 Titik dan Waktu Pengambilan Sampel | 36 |
| Tabel 3. 5 Data Sampel Penelitian | 37 |
| Tabel 4. 1 Karakteristik Awal Lindi | 41 |
| Tabel 4. 2 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindi.. | 89 |
| Tabel 4. 3 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 90 |
| Tabel 4. 4 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindi. | 90 |
| Tabel 4. 5 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl..... | 90 |
| Tabel 4. 6 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 90 |
| Tabel 4. 7 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 90 |
| Tabel 4. 8 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl..... | 91 |
| Tabel 4. 9 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ | 91 |
| Tabel 4. 10 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ | 91 |
| Tabel 4. 11 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter TDS | 93 |

| | |
|--|----|
| Tabel 4. 12 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Klorida..... | 93 |
| Tabel 4. 13 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Ammonium | 94 |
| Tabel 4. 14 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Total Fosfat | 95 |
| Tabel 4. 15 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter COD..... | 96 |

DAFTAR LAMPIRAN

| | |
|---|-----|
| LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM | 107 |
| LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS | 123 |
| LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN | 173 |

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengolahan lindi dari Tempat Pemrosesan Akhir (TPA) menjadi tantangan dalam pengelolaan sampah negara berkembang termasuk Indonesia. Dalam upaya memenuhi baku mutu dari Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah, pengelola TPA harus mulai meningkatkan efisiensi pengolahan lindi. Kombinasi dari polutan BOD₅ (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), amonia dan garam anorganik menjadikan lindi sebagai sumber potensial pencemaran air sungai dan air permukaan (Umar *et al.*, 2010). Selain itu, lindi memiliki konsentrasi nutrien nitrogen (N) dan fosfor (P) yang tinggi (Khai dan Trang, 2012) sehingga dibutuhkan pengolahan yang mampu mencegah terjadinya eutrofikasi akibat kelebihan nutrien namun sekaligus juga mampu memenuhi kebutuhan nutrien karena sumber yang terbatas di alam (Li *et al.*, 2016).

Pada fase biodegradasi *acidogenic*, BOD pada lindi berusia muda berkisar antara 4.000-13.000 mg L⁻¹, COD antara 30.000-60.000 mg L⁻¹ dan BOD₅/COD sebesar 0,4-0,5. Lindi juga mengandung logam berat, senyawa organik terklorinasi dan garam anorganik (Foo dan Hameed, 2009). Karakteristik lindi bergantung dari beberapa faktor antara lain jenis sampah yang ditimbun di TPA, kondisi hidrogeologi TPA, usia TPA dan fase degradasi sampah (Kjeldsen *et al.*, 2002). Semakin tua umur lindi pada umumnya akan menurunkan nilai BOD₅/COD (Kurniawan *et al.*, 2006). Selain itu, natrium, kalium dan amonium adalah komponen anorganik yang sering ditemukan pada lindi (natrium hingga 10,93 mg L⁻¹; kalium hingga 2.243 mg L⁻¹ ; amonium hingga 13.000 mg L⁻¹ dan konduktivitas antara 3-41 mS cm⁻¹).

Pengolahan biologis yang meliputi proses anaerobik dan aerobik cukup efektif untuk pengolahan lindi tahap awal dengan BOD₅/COD tinggi (Ehrig dan Stegmann, 1992) sedangkan BOD₅/COD lindi bisa rendah (<0,1) pada lindi yang sudah terstabilisasi (Kurniawan *et al.*, 2006). Karakteristik lindi dengan konsentrasi amonia tinggi bersifat toksik pada pengolahan biologis (Tatsi *et al.*, 2003) namun hingga sekarang pengolahan lindi di Indonesia masih berfokus pada pengolahan biologis seperti kolam stabilisasi. Sebagai alternatif, *Advanced Oxidation Processes* (AOPs) menjadi perhatian lebih dalam menyisihkan polutan organik lindi dan membuat polutan organik lebih mudah untuk mengalami biodegradasi (Renou *et al.*, 2008).

Proses fisik-kimia merupakan proses yang dapat diterapkan untuk pengolahan pendahuluan, pengolahan tersier, maupun keseluruhan pengolahan. Proses fisik-kimia dalam pengolahan lindi dapat meliputi flokulasi dan presipitasi (Amokrane *et al.*, 1997), adsorpsi (Copa dan Meidi, 1986), teknologi membran (Ushikoshi *et al.*, 2002) serta oksidasi kimia (Lopez *et al.*, 2004) seperti elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia. Sebagai salah satu teknologi AOPs, proses fenton mampu menyisihkan polutan organik pada lindi hingga 89% untuk COD yang memiliki konsentrasi awal 1-9 g L⁻¹. Namun, proses fenton memerlukan banyak biaya dalam penyediaan bahan kimia dan teknologi pengolahan lumpur (Kurniawan *et al.*, 2006) serta kurang efektif dalam penyisihan nitrogen (Kochany dan Lipczynska-Kochany, 2009). Pada oksidasi elektrokimia penyisihan polutan organik terjadi melalui mekanisme oksidasi langsung di anoda maupun tidak langsung oleh hidroksil radikal yang kuat (Chiang *et al.*, 1995). Keunggulan dari proses oksidasi elektrokimia adalah praktis, mampu dilakukan secara otomatis dan hanya membutuhkan sedikit atau tidak membutuhkan tambahan bahan kimia (Anglada *et al.*, 2011).

Dalam *recovery* spesies ion, elektrodialisis memiliki keunggulan dari proses adsorpsi maupun filtrasi dengan membran bertekanan. Keunggulan elektrodialisis adalah tidak membutuhkan tambahan bahan kimia dan tidak menghasilkan limbah (Huang *et al.*, 2007). Pada penelitian ini dipilih metode elektrodialisis untuk dapat memperoleh nilai efisiensi yang lebih tinggi dalam mendapatkan kembali kadar nitrogen dan fosfor

dalam konsentrasi NH_4^+ dan PO_4^{3-} . Hal utama yang perlu diperhatikan dari teknologi elektrodialisis adalah mengetahui karakteristik ion yang akan dipisahkan, fasilitas elektrik, penggunaan daya, kuat arus, *cross flow velocity*, jenis membran, temperatur, elektroda, dan jarak antar elektroda (Padaki *et al.*, 2015). Konsentrasi klorida, penambahan elektrolit dan pH juga memengaruhi oksidasi elektrokimia (Anglada *et al.*, 2009). Oksidasi tidak langsung sangat dipengaruhi oleh kondisi pH awal dalam terbentuknya klorin sebagai oksidator dari proses elektrokimia (Vlyssides *et al.*, 2001). Variasi penambahan NaCl dan variasi pH awal proses menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Kombinasi dari proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia dalam satu reaktor diharapkan dapat secara efektif menyisihkan polutan organik lindi, menyisihkan nutrisi dalam konsentrasi NH_4^+ dan total fosfat dan menghemat konsumsi energi. Lindi yang digunakan dalam penelitian ini adalah lindi TPA Ngipik, Gresik. Diharapkan dengan adanya penelitian ini dapat diberikan rekomendasi alternatif pra-pengolahan untuk instalasi pengolahan lindi bersalinitas yaitu di TPA Ngipik, Gresik maupun lindi lain dengan karakteristik serupa.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian adalah :

1. Bagaimana efisiensi dan kebutuhan energi dari kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia dalam penurunan polutan organik pada lindi.
2. Bagaimana potensi *recovery* nutrisi dalam konsentrasi NH_4^+ dan total fosfat dari lindi hasil kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menentukan efisiensi dan menghitung kebutuhan energi dalam penurunan polutan organik pada lindi dengan kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia.

2. Menentukan potensi *recovery* nutrisi dalam konsentrasi NH_4^+ dan total fosfat dari lindi hasil kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini adalah :

1. Lindi yang digunakan sebagai sampel adalah lindi TPA Ngipik, Gresik.
2. Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemulihan Air dan Workshop Jurusan Teknik Lingkungan ITS.
3. Pembuatan alat/ model penelitian dilakukan dalam skala laboratorium.
4. Elektroda yang digunakan adalah karbon dan *stainless steel* dengan arus listrik DC 0,25 A.
5. Parameter utama yang dianalisis adalah COD, TDS, pH, Cl^- , NH_4^+ dan total fosfat. Parameter pendukung yang dianalisis adalah BOD_5 dan total klorin.
6. Variabel yang digunakan adalah penambahan NaCl dan pengondisian pH awal proses.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi ilmiah tentang alternatif pengolahan untuk penurunan polutan organik yang efektif beserta kebutuhan energi prosesnya pada lindi TPA Ngipik, Gresik.
2. Memperoleh informasi tentang potensi *recovery* nutrisi dalam konsentrasi NH_4^+ dan total fosfat dari hasil kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia pada lindi TPA Ngipik, Gresik.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dibahas mengenai karakteristik lindi secara umum, karakteristik lindi TPA Ngipik, proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia. Selain itu, dijelaskan pula faktor yang memengaruhi proses terutama dalam penyisihan polutan organik dan *recovery* nutrisi pada lindi.

2.1 Karakteristik Lindi

2.1.1 Karakteristik Umum Lindi

Lindi diproduksi dari TPA akibat adanya kontak antara sampah dengan air yang memiliki potensi bahaya bagi lingkungan. Lindi merupakan air yang masuk ke tumpukan sampah di TPA yang dapat berasal dari tanah penutup, kadar air sampah, air hujan, air tanah yang dikurangi dengan air yang lepas sebagai uap air, pembentukan gas dan lain-lain yang melebihi kemampuan yang mampu ditampung oleh *field capacity* sampah (Tchobanoglous *et al.*, 1993). Ketika air mengalami perkolasi ke dalam sampah yang sedang mengalami dekomposisi maka akan melarutkan kandungan biologis dan kimiawi dari sampah.

Volume lindi dan konsentrasi polutan di dalamnya tergantung pada beberapa faktor antara lain karakteristik sampah, kondisi hidrogeologis, usia TPA dan fase dekomposisi sampah (Kochany dan Lipczynska-Kochany, 2009). Lindi memiliki kandungan organik yang tinggi (dinyatakan sebagai COD, BOD₅ dan TOC) dan konsentrasi nutrisi yang tinggi (N dan P). Pengolahan lindi memerlukan berbagai aplikasi dari proses karena kandungan amonia tinggi dan rasio BOD/COD yang tinggi (Zhang *et al.*, 2009). Karakteristik lindi berdasarkan umur TPA disajikan dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Karakteristik Lindi Berdasarkan Usia TPA

| Parameter | <i>Young Leachate</i> | <i>Stabilized Leachate</i> |
|--|---|--|
| Usia | Kurang dari 5 tahun | Lebih dari 10 tahun |
| Komposisi | Senyawa dengan berat molekul rendah seperti <i>volatile fatty acid</i> (asam asetat, asam butiran dan asam propionat) | Senyawa dengan berat molekul tinggi seperti asam humat dan asam fulvat |
| pH | 4 | 7-9 |
| NH ₃ -N (mg L ⁻¹) | 500-2.000 | 3.000-5.000 |
| BOD (mg L ⁻¹) | 4.000-13.000 | <2.000 |
| COD (mg L ⁻¹) | 30.000-60.000 | 5.000-20.000 |
| BOD ₅ /COD | 0,4-0,7 | <0,1 |
| COD/TOC | > 2,8 | < 2,0 |

Sumber : (Kurniawan *et al.*, 2006)

2.1.2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik

Lindi yang dihasilkan TPA Ngipik tergolong lindi tua karena bersumber dari sel timbunan sampah yang berusia > 10 tahun. Karakteristik lindi bersifat fluktuatif bergantung pada musim. Karakteristik lindi berdasarkan musim disajikan dalam Tabel 2.2 berikut ini:

Tabel 2. 2 Karakteristik Lindi TPA Ngipik Gresik Berdasarkan Musim

| Parameter | Kemarau ^{[1],[3]} | Penghujan ^{[2],[4]} |
|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| pH | 7,6-8,65 ^[1] | 7,37 ^[2] |
| COD (mg/L) | 3.878,3-4640 ^[1] | 2.462 ^[2] |
| BOD ₅ (mg/L) | 2.876 ^[1] | 1.109 ^[2] |
| Salinitas (ppt) | 6 ^[1] | 6 ^[2] |
| Klorida (mg/L) | 4918 ^[4] | - |
| Ammonium (mg/L) | - | 200 ^[3] |

Sumber : [1] Agustina (2012); [2] Putri (2014); [3] Aljumriana (2015); [4] Yashadi (2015)

2.2 Baku Mutu Lindi di Indonesia

Pada Tabel 2.3 berikut ini tercantum baku mutu lindi berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah.

Tabel 2. 3 Baku Mutu Lindi Indonesia

| Komponen | Kadar Paling Tinggi | |
|----------|---------------------|--------------------|
| | Nilai | Satuan |
| pH | 6-9 | - |
| BOD | 150 | mg L ⁻¹ |
| COD | 300 | mg L ⁻¹ |
| TSS | 100 | mg L ⁻¹ |
| N Total | 60 | mg L ⁻¹ |
| Merkuri | 0,005 | mg L ⁻¹ |
| Kadmium | 0,1 | mg L ⁻¹ |

2.3 Oksidasi Elektrokimia

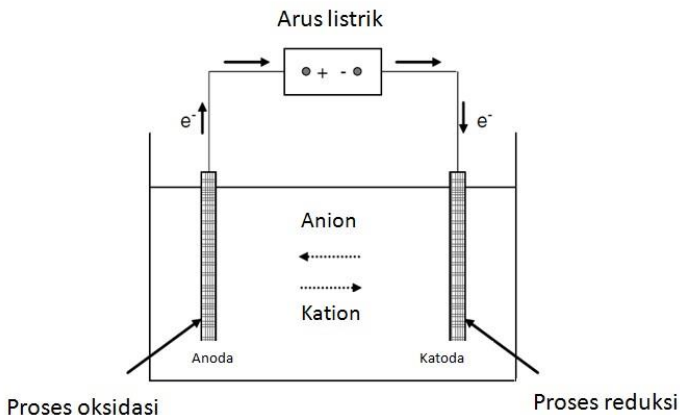
Oksidasi elektrokimia merupakan salah satu alternatif yang efektif untuk menangani polutan pada air limbah (Rao *et al.*, 2001). Oksidasi elektrokimia meliputi arus listrik *Direct Current* (DC), katoda, anoda dan elektrolit (media yang menyediakan mekanisme transportasi ion antara katoda dan anoda). Tujuan dari proses oksidasi dalam pengolahan lindi yaitu untuk mengoksidasi substansi organik ke bentuk paling stabil dari oksidasinya yaitu menjadi karbon dioksida dan air dan untuk meningkatkan biodegradabilitas dari polutan organik sehingga cocok dengan pengolahan biologis yang ekonomis (Li *et al.*, 2015).

Oksidasi elektrokimia pada lindi di bawah kondisi yang tepat dapat menyisihkan sebagian besar COD dan menurunkan warna secara signifikan. Keunggulan penting dari oksidasi elektrokimia adalah dapat mengoksidasi polutan organik menjadi CO₂ dan air. Penyisihan polutan organik dipengaruhi oleh

karakteristik lindi berdasarkan usia TPA. Semakin tinggi konsentrasi COD, BOD dan rasio BOD/COD seperti pada lindi berusia muda maka kadar amonia makin rendah. Sebaliknya, semakin tua usia lindi, konsentrasi COD, BOD dan rasio BOD/COD makin rendah sehingga akan makin sulit untuk diolah dengan pengolahan biologis. Pilihan bahan elektroda juga merupakan faktor kunci dalam desain reaktor dengan berfokus pada energi aktivasi yang tinggi untuk mencegah reaksi lain yang tidak diinginkan (Deng dan Englehardt, 2007).

2.3.1 Mekanisme Oksidasi Elektrokimia

Dalam oksidasi elektrokimia, proses reduksi terjadi di katoda di mana elektron ditolak, dan sebagian logam berat dihilangkan. Di anoda terjadi proses oksidasi di mana merupakan tempat yang dituju elektron dan tempat dihilangkannya sejumlah polutan seperti senyawa organik. Sebagai tambahan, reaksi oksidasi dapat terjadi di *bulk solution* dengan oksidan yang dihasilkan dari elektroda yang selanjutnya disebut oksidasi tidak langsung (Deng dan Englehardt, 2007). Gambar konseptual dari proses oksidasi elektrokimia dapat dilihat pada Gambar 2.1. berikut:



Gambar 2. 1 Proses Oksidasi Elektrokimia
(Anglada *et al.*, 2009)

Oksidasi elektrokimia dapat terjadi melalui dua mekanisme yang berbeda yaitu oksidasi anodik secara langsung di mana polutan dihancurkan di permukaan anoda dan oksidasi secara tidak langsung di mana mediator seperti klorin, HClO , $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ diproduksi secara elektrokimia untuk mengoksidasi polutan.

1. Oksidasi Langsung

Oksidasi langsung meliputi dua langkah yaitu difusi polutan dari elektrolit menuju permukaan anoda dan oksidasi polutan di permukaan anoda. Efisiensi proses elektrokimia bergantung pada hubungan transfer massa dari substrat dan transfer elektron di permukaan elektroda. Kecepatan perpindahan elektron bergantung pada aktivitas elektroda dan kuat arus listrik (Anglada *et al.*, 2011). Pada oksidasi langsung dapat terjadi dua mekanisme berikut :

- Konversi secara elektrokimia

Polutan organik hanya dioksidasi sebagian sehingga memerlukan pengolahan lanjutan.

Reaksi yang terjadi adalah:



- Degradasi secara elektrokimia

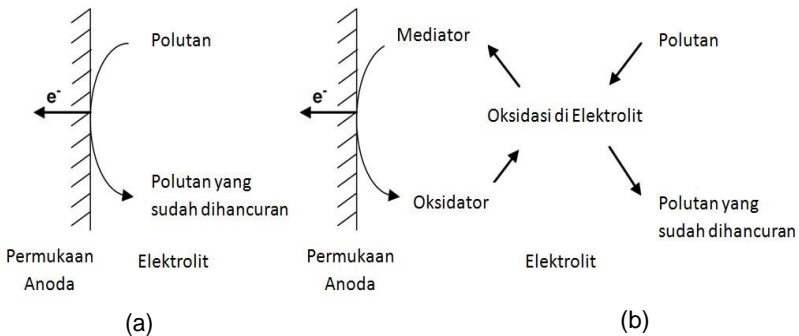
Polutan organik diubah menjadi air, karbon dioksida dan bentuk inorganik lainnya. Reaksi yang terjadi adalah:



Pada oksidasi langsung peran anoda sangat memengaruhi proses. Anoda aktif melibatkan proses lainnya seperti adsorpsi (elektrosorpsi) sedangkan anoda yang tidak aktif tidak mendukung terjadinya elektrosorpsi (Martinez-Huitle dan Ferro, 2006). Elektrosorpsi merupakan peristiwa tertangkapnya polutan pada air limbah oleh muatan yang berlawanan di permukaan elektroda. Ion dalam air limbah tersebut teradsorpsi dan tersisihkan dari air limbah (Choi dan Choi, 2010).

2. Oksidasi Tidak Langsung

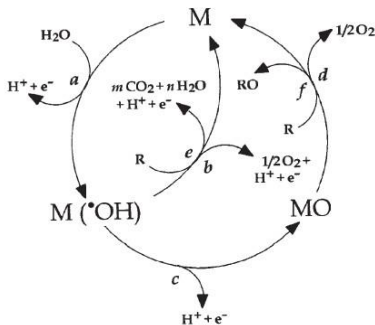
Dalam oksidasi tidak langsung, oksidator kuat dihasilkan secara elektrokimia di permukaan anoda dan menghancurkan polutan pada elektrolit. Oksidator yang dihasilkan pada umumnya adalah klorin yang dihasilkan dari oksidasi klorida di anoda. Oksidator lainnya antara lain hidrogen peroksida, $\text{H}_2\text{S}_2\text{O}_8$ dan ozon. Penyisihan amonia terjadi di proses ini. Proses oksidasi langsung dan oksidasi tidak langsung dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut:



Gambar 2. 2 Mekanisme Oksidasi
(a) Oksidasi Langsung (b) Oksidasi Tidak Langsung

(Anglada *et al.*, 2009)

Mekanisme dari oksidasi elektrokimia langsung maupun tidak langsung tertera pada Gambar 2.3



Gambar 2. 3 Mekanisme Oksidasi pada Anoda

Reaksi-reaksi tersebut meliputi anoda tidak aktif di mana yang terjadi reaksi adalah b dan e sedangkan pada anoda aktif terjadi reaksi a, c, d dan f.:

- (a) pembentukan hidroksil radikal OH^* ;
 - (b) evolusi oksigen akibat oksidasi elektrokimia dari hidroksil radikal;
 - (c) pembentukan oksida logam MO ;
 - (d) evolusi oksigen akibat dekomposisi kimiawi dari oksida logam;
 - (e) degradasi elektrokimia senyawa organik oleh hidroksi radikal;
 - (f) konversi elektrokimia senyawa organik R oleh oksida logam.
- (Martinez-Huitle dan Ferro, 2006).

2.3.2 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Oksidasi Elektrokimia

Beberapa faktor yang berpengaruh pada proses oksidasi elektrokimia antara lain :

a. Bahan Anoda

Pemilihan bahan elektroda merupakan hal yang penting sebab memengaruhi selektivitas dan efisiensi dari proses. Elektroda harus memiliki karakteristik sebagai berikut :

- Memiliki stabilitas yang tinggi secara fisik maupun kimiawi, tahan terhadap erosi dan korosi
- Memiliki konduktivitas yang tinggi
- Rasio harga/usia pakai yang rendah (ekonomis) dan harus tahan lama

Bahan anoda yang memiliki karakteristik-karakteristik tersebut dapat menyebabkan penyisihan COD dan $\text{NH}_3\text{-N}$ yang tinggi. Bahan anoda yang sering digunakan antara lain *ternary oxidecoated titanium* (SPR), *binary oxidecoated titanium* Ru-Ti oxide (DSA), *PbO₂-coated titanium* (PbO_2/Ti), grafit, *SnO₂-coated titanium* (SnO_2/Ti), besi (Fe) and aluminum (Al), dan penyisihan COD dari yang paling efektif adalah pada material $\text{SPR} > \text{DSA} > \text{PbO}_2/\text{Ti} > \text{grafit}$ (Chiang *et al.*, 1995)

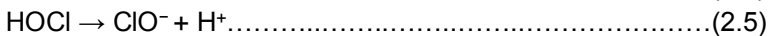
Efisiensi penyisihan untuk COD mencapai 73%, 57% untuk TOC, 86% untuk warna dan 49% untuk amonia pada arus 116 mAcm^{-2} dengan menggunakan elektroda *oxide-coated*

titanium (Moraes dan Bertazzoli, 2005). Sedangkan pada penelitian (Bashir *et al.*, 2009) yang menggunakan karbon grafit mencapai 70% untuk BOD, 68% untuk COD dan 84% untuk warna ketika arus listrik sebesar 79,9 mA cm⁻² dan reaksi berlangsung selama dua jam. Karbon merupakan elektroda yang mudah didapat, murah dan lebih inert dibandingkan perak atau tembaga.

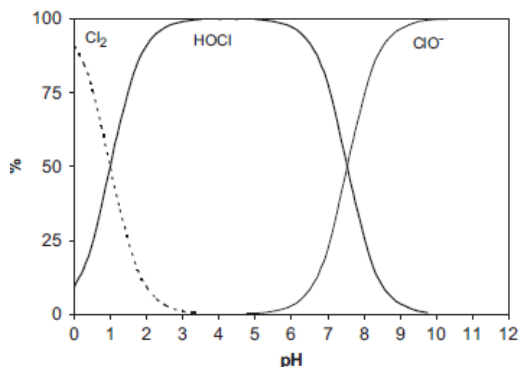
b. pH

Nilai pH, seperti suhu berpengaruh terutama pada proses oksidasi tidak langsung dengan mediator berupa klorida. pH berpengaruh pada laju oksidasi sebab menentukan spesies klor aktif yang muncul pada efluen. Terbentuknya klorin terjadi pada anoda (persamaan (2.3)). Pada pH lebih rendah dari 3,3, spesies klor dominan yang aktif berupa Cl₂ dan pada pH yang lebih tinggi membentuk HClO pada pH < 7,5 (persamaan (2.4)) dan ClO⁻ pada pH > 7,5 (persamaan (2.5)).

Pada prinsipnya operasi pada kondisi asam yang kuat menjadi pilihan yang paling baik di mana klorin menjadi oksidator paling kuat, diikuti oleh HClO (Canizares *et al.*, 2005). Namun sistem sering mengakibatkan terjadinya desorpsi yang menghalangi fungsi klorin sebagai oksidator. Oleh sebab itu, nilai pH yang lebih tinggi secara teoritis mampu meningkatkan oksidasi elektrokimia dari polutan di mana HClO dan ClO⁻ tidak terpengaruh oleh desorpsi gas dan dapat bertindak sebagai oksidator (Anglada *et al.*, 2011). Berikut ini merupakan reaksi evolusi klorin pada proses oksidasi tidak langsung yang dipengaruhi oleh pH:



Klorin sebagai mediator pada oksidasi tidak langsung memiliki bentuk yang berbeda berdasarkan pH. Berikut ini pada Gambar 2.4 merupakan grafik persenyawaan klorin yang terbentuk berdasarkan pH:



Gambar 2. 4 Persenyawaan Klorin Berdasarkan pH
(Deborde dan Gunten, 2009)

c. Arus Listrik

Penambahan arus akan menambah efisiensi penyisihan COD dan warna namun tidak secara signifikan. Efisiensi penyisihan akan bergantung dari karakteristik air limbah yang diolah.

e. Penambahan Elektrolit dan Konsentrasi Ion Klorida

Peningkatan konsentrasi Cl^- meningkatkan penyisihan polutan namun meningkatkan bahaya terbentuknya senyawa organik terklorinasi. Makin tinggi konsentrasi elektrolit maka konduktivitasnya akan semakin tinggi dan mengurangi kebutuhan tegangan listrik dari sel pada arus listrik tertentu. Maka, oksidasi elektrokimia akan lebih ekonomis jika air limbah yang diolah memiliki salinitas yang tinggi (Anglada *et al.*, 2009).

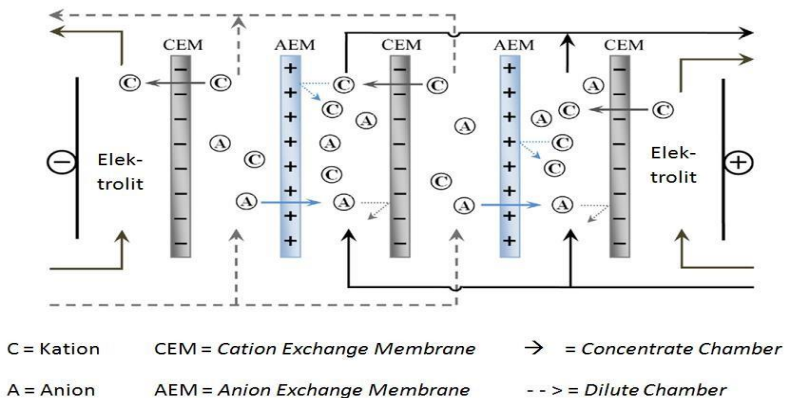
2.4 Elektrodialisis

2.4.1 Mekanisme Elektrodialisis

Elektrodialisis adalah sebuah proses untuk pemisahan ion dengan menggunakan membran yang bersifat selektif. Membran yang dapat dilalui ion bermuatan positif seperti natrium dan kalium disebut membran kation. Membran yang dapat dilalui ion bermuatan negatif seperti klorida dan fosfat disebut membran anion. Perbedaan utama antara elektrodialisis dengan proses

membran adalah pada elektrodialisis terdapat adanya penggunaan arus listrik namun tidak menggunakan tekanan untuk membuat ion-ion melalui membran. Tekanan ini merupakan salah satu faktor mahal biaya untuk proses dengan membran lainnya (Tanaka, 2007). Ion positif (kation) bergerak menuju katoda sedangkan ion negatif (anion) bergerak menuju anoda.

Proses elektrodialisis dapat berlangsung secara kontinu ataupun *batch*. Jika menggunakan proses kontinu, influen dialirkan dalam jumlah tertentu secara terus menerus melalui sejumlah kompartemen yang berisikan larutan tertentu. Sedangkan proses *batch* dilakukan dengan mengalirkan influen dengan volume tertentu secara bertahap, hasil effluen diresirkulasikan lagi hingga tercapai hasil yang diinginkan. Proses elektrodialisis dialiri oleh arus *Direct Current* (DC) yang menyebabkan ion-ion dapat bergerak menuju elektroda yang dalam prosesnya terdapat membran yang menjadi penghalang bagi ion yang memiliki muatan yang berbeda. Pada Gambar 2.5. berikut ini menunjukkan proses yang berlangsung dalam elektrodialisis melalui *Cation Exchange Membrane* dan *Anion Exchange Membrane*:



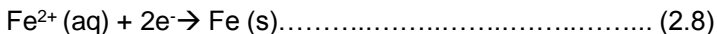
Gambar 2. 5 Proses Elektrodialisis
(Jiang *et al.*, 2014)

Ketika anion berusaha bergerak menuju anoda, anion tersebut dapat melewati membran anion yang pertama dilewatinya namun akan terhenti oleh membran kation pertama yang ditemuinya begitu pula sebaliknya untuk kation (Schoeman dan Thompson, 1996).

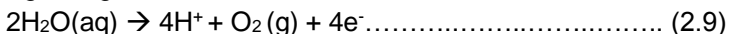
Pada elektrodialisis terjadi proses oksidasi reduksi pada elektroda. Pada penggunaan elektroda inert, reaksi yang terjadi pada katoda dan anoda berbeda. Pada reaksi di katoda, kation logam dari golongan IA, IIA, IIIA, Al dan Mn tidak dapat direduksi dalam pelarut air sehingga reaksi yang terjadi adalah:



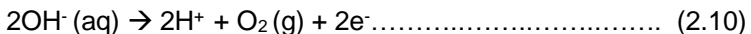
Pada kation logam H^+ dan logam selain golongan IA, IIA, IIIA, Al dan Mn dapat tereduksi dengan cara:



Pada anoda, anion sisa asam oks (SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , ClO_4^-) tidak dapat teroksidasi dalam pelarut air, sebagai gantinya air yang mengalami oksidasi berikut:



Untuk anion lain (OH^- , Cl^- , Br^-) mengalami oksidasi sebagai berikut:

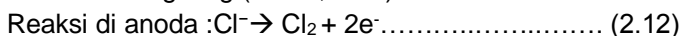


Mekanisme dari penyisihan amonium melibatkan reaksi yang diperantarai oleh klor dan membentuk nitrogen sehingga dapat terjadi penyisihan Total N. Konsentrasi amonia nitrogen bertambah seiring dengan penambahan umur TPA karena adanya proses hidrolisis dan fermentasi dari fraksi nitrogen *biodegradable* (Abbas *et al.*, 2009). Konsentrasi amonia beragam dari berbagai TPA dari puluhan hingga ratusan mg NH_4/L , ribuan (2.000 NH_4/L) hingga lebih dari 10.000 mg NH_4/L . Konsentrasi rata-rata amonia pada lindi bervariasi antara 500-1.500 mg/L setelah periode 3-8 tahun dan berlanjut pada rentang ini hingga lebih dari 50 tahun (Kulikowska dan Klimiuk, 2008). Amonia nitrogen pada lindi yang terstabilisasi bisa bervariasi antara

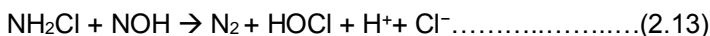
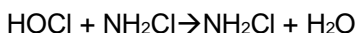
3.000-5.000 mg/L (Li dan Zao, 2002). Amonia nitrogen menjadi toksik utama pada makhluk hidup. Makin tinggi konsentrasi amonia maka akan meningkatkan pertumbuhan alga, mengakibatkan eutrofikasi akibat bertambahnya oksigen terlarut.

Berdasarkan toksisitasnya amonia juga dapat mengganggu proses pengolahan secara biologis (Deng dan Englehardt, 2007).

Berikut ini merupakan mekanisme penyisihan NH_3 oleh klorin atau asam hipoklorit yang diproduksi secara elektrokimia dengan oksidasi tidak langsung (White, 1986):



Reaksi di elektrolit :



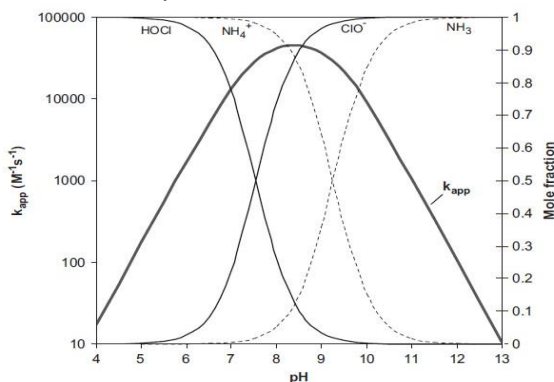
Berikut merupakan reaksi ammonium dengan hipoklorit :



Berikut merupakan reaksi amonia dengan hipoklorit dan asam hipoklorit :



Pada Gambar 2.6 berikut merupakan bentuk persenyawaan amonium berdasarkan pH:



Gambar 2. 6 Persenyawaan Ammonium Berdasarkan pH

(Qiang dan Adams, 2004)

Pada ion fosfat persenyawaan fosfat dan mobilitas ionnya pada proses elektrodialisis bergantung pula pada pH. Berikut ini pada Tabel 2.4 merupakan bentuk spesies ion fosfat berdasarkan pH dan pada Tabel 2.5 merupakan mobilitas ionnya (Engelke dan Strain, 1954) :

Tabel 2. 4 Bentuk spesies ion asam fosfat berdasarkan pH

| pH | Bentuk spesies ion (%) | | | |
|------|-------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| | H_3PO_4 | H_2PO_4^- | HPO_4^{2-} | PO_4^{3-} |
| 2 | 57 | 43 | - | - |
| 4,5 | - | 100 | - | - |
| 9 | - | 2 | 98 | - |
| 11,7 | - | - | 80 | 20 |

Tabel 2. 5 Mobilitas spesies ion asam fosfat berdasarkan pH

| pH | Mobilitas ion (Cm/Jam/Volt/Cm) | | | |
|------|--------------------------------|---------------------------|---------------------|--------------------|
| | H_3PO_4 | H_2PO_4^- | HPO_4^{2-} | PO_4^{3-} |
| 2 | -0,05 | 0,87 | - | - |
| 4,5 | - | 0,87 | - | - |
| 9 | - | - | 0,88 | - |
| 11,7 | - | - | 0,88 | 3,2 |

2.4.2 Faktor-faktor yang Berpengaruh pada Proses Elektrodialisis

Beberapa faktor yang berpengaruh pada proses elektrodialisis antara lain :

a. Direct Current Supply (DC)

Direct Current Supply adalah cara yang efektif untuk mempercepat perpindahan kation dan anion menuju katoda dan anoda. Kecepatan perpindahan ion ini dapat diatur dengan variabel kuat arus (Huang *et al.*, 2007).

b. Elektroda

Elektroda adalah konduktor yang digunakan untuk mengalirkan arus listrik dalam sel elektrolisis (Riyanto, 2013).

Terdapat dua jenis elektroda, yaitu elektroda inert dan elektroda tidak inert. Elektroda inert adalah elektroda yang tidak ikut bereaksi sebagai katoda maupun anoda, sehingga yang mengalami proses reduksi dan oksidasi dalam elektrolisis adalah elektrolit. Contoh elektroda inert antara lain, karbon (C), dan platina (Pt). Sedangkan elektroda tidak inert adalah elektroda yang ikut bereaksi dalam proses elektrolisis. Contoh elektroda tidak inert antara lain besi (Fe), aluminium (Al), tembaga (Cu), seng (Zn), perak (Ag), dan emas (Au).

Elektroda memiliki kriteria cepat dan tidaknya tereduksi yang dapat dilihat pada deret volta berikut:

Li-K-Ba-Sr-Ca-Na-Mg-Al-Mn-Zn-Cr-Fe-Cd-Co-Ni-Sn-Pb-H⁺-
Cu-Hg-Ag-Pt-Au

Semakin ke kiri nilai potensi reduksinya semakin kecil yang berarti logam tersebut semakin sulit mengalami reduksi dan cenderung mengalami oksidasi dan begitu juga sebaliknya. Perbedaan antara nilai tegangan di mana terjadi oksidasi air terjadi dan nilai dari termodinamikanya merupakan nilai *oxygen evolution overpotential*. Pada Tabel 2.6 berikut merupakan nilai *oxygen evolution overpotential* dari beberapa material elektroda.

Tabel 2. 6 Nilai Oxygen Evolution Overpotential dari Beberapa Material Elektroda

| Anoda | Tegangan (V) | Kondisi |
|------------------|--------------|--|
| Pt | 1,3 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| Pt | 1,6 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| IrO ₂ | 1,6 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| Grafit | 1,7 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| PbO ₂ | 1,9 | 1 mol/L H ₂ SO ₄ |
| SnO ₂ | 1,9 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| TiO ₂ | 2,2 | 1 mol/L H ₂ SO ₄ |
| Si/BDD | 2,3 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |
| Ti/BDD | 2,7 | 0,5 mol/L H ₂ SO ₄ |

Sumber : (Sires *et al.*, 2008)

Nilai *oxygen evolution overpotential* yang rendah menandakan aktivitas elektrokimia sangat sensitif terhadap perubahan oksigen dan tidak sensitif terhadap oksidasi senyawa organik. Oksidasi yang efektif pada jenis anoda ini terjadi di arus listrik yang rendah. Pada arus listrik yang tinggi terjadi produksi oksigen yang berpotensi mengurangi potensi oksidasi. Sebaliknya, pada elektroda dengan nilai *oxygen evolution overpotential* tinggi, arus listrik yang tinggi dapat berakibat kecilnya pengaruh reaksi lain dari oksigen. Berdasarkan beberapa penelitian, *Boron-doped diamond* (BDD) memiliki efisiensi yang tinggi dalam laju oksidasi dan pemakaian arus listrik dibandingkan oksida dari logam seperti PbO_2 , SnO_2 dan TiO_2 (Sires *et al.*, 2008).

c. *Ion Exchange Membrane*

Terdapat dua jenis *ion exchange membrane* yang dapat diterapkan pada proses elektrodialisis yaitu *Cation Exchange Membrane* (CEM) dan *Anion Exchange Membrane* (AEM). CEM merupakan membran yang melewatkan ion positif sedangkan AEM merupakan membran yang melewatkan ion negatif. Keduanya memiliki hambatan listrik yang rendah, tidak larut dalam air, mudah dalam penggantianannya, tahan terhadap potensi penyumbatan, mudah dibersihkan, dan tahan terhadap fluktuasi pH. Membran ini selektif terhadap ion yang melaluinya, sehingga hanya ion-ion tertentu yang dapat lolos (Valero *et al.*, 2011).

d. Pelarut dan Larutan

Elektrolit adalah zat yang terlarut dan bentuk ion. Zat yang jumlahnya lebih sedikit dalam larutan disebut zat terlarut sedangkan zat yang jumlahnya lebih banyak disebut pelarut

e. *Cross Flow Velocity*

Semakin tinggi *Cross Flow Velocity* akan meningkatkan akumulasi yang dapat mengurangi konsentrasi polarisasi dan meningkatkan tingkat penyerapan

f. Temperatur

Semakin tinggi temperatur akan meningkatkan perpindahan massa dan laju difusi pada larutan.

g. *Trans Membrane Pressure (TMP)*

Semakin tinggi TMP akan meningkatkan *driving force*.

h. pH

Tingkat pH dapat memengaruhi material dasar membran (Padaki *et al.*, 2015).

i. Salinitas

Produk utama dari oksidasi amonium dengan proses elektrokimia adalah gas nitrogen (Perez *et al.*, 2012). Saat NaCl ditambahkan, gas nitrogen tetap menjadi produksi dominan dengan presentase 80%. Di akhir percobaan hanya 18-26% amonium tersisihkan dapat diperbaharukan sebagai nitrat sedangkan nitrit tidak terdeteksi dalam sampel. Nitrat terbentuk di awal waktu percobaan dan seiring dengan waktu mencapai nilai maksimum kemudian menurun. Makin tinggi konsentrasi NaCl awal memengaruhi nilai maksimum konsentrasi nitrat dan makin cepat penurunannya.

Teknologi elektrodialisis memiliki beberapa keuntungan dibandingkan teknik konvensional seperti adsorpsi dan filtrasi membran dengan menggunakan tekanan. Elektrodialisis serupa dengan proses dialisis namun perpindahan ionnya dipercepat dengan memanfaatkan arus listrik. Hal ini menyebabkan *recovery* spesies ion dari larutan *aqueous* dapat dilakukan tanpa menggunakan konsumsi bahan kimia dan tidak menyebabkan limbah baru (Huang *et al.*, 2007).

Elektrodialisis juga sangat selektif, mampu menghasilkan produk dengan rasio *recovery* yang tinggi dan dapat menghancurkan beberapa komponen di air limbah serta dapat dioperasikan secara kontinyu. Berdasarkan segala keuntungan di atas maka elektrodialisis perlu dikembangkan untuk pengolahan ke depan. Perbandingan elektrodialisis dengan *Reverse Osmosis* (Valero *et al.*, 2011) tercantum dalam Tabel 2.7 berikut:

Tabel 2. 7 Perbandingan Proses Elektrodialisis dengan *Reverse Osmosis*

| Parameter | Elektrodialisis | Reverse Osmosis |
|----------------------------|---|--|
| Air limbah yang diolah | <ul style="list-style-type: none"> -Mampu mengolah air limbah dengan <i>Silt Density Index</i> (SDI) rata-rata sebesar 12. -Tidak sensitif terhadap permasalahan pada pra-pengolahannya | <ul style="list-style-type: none"> -Mampu mengolah air limbah dengan <i>Silt Density Index</i> (SDI) rata-rata sebesar 3. -Sensitif terhadap permasalahan pada pra-pengolahannya. |
| Keberadaan residual klorin | <ul style="list-style-type: none"> -Mampu beroperasi pada keadaan residual klorin bebas hingga 1 ppm sehingga mampu meminimalkan potensi <i>biological fouling</i> dari membran. | <ul style="list-style-type: none"> - Harus melalui proses deklorinasi terlebih dahulu untuk menjaga membran RO. |
| Pencucian membran | <ul style="list-style-type: none"> -Tidak terganggu oleh bakteri ataupun temperatur yang tinggi sehingga tidak membutuhkan tempat maupun waktu penyimpanan khusus bagi air limbah yang akan diolah. Membran dapat dicuci dengan asal atau soda kaustik tanpa merusak properti membran. | <ul style="list-style-type: none"> - Membutuhkan pencucian secara khusus dan kebutuhan bahan kimia pencuci lebih mahal. Konfigurasi membran yang berbentuk spiral menyebabkan membran tidak bisa dibersihkan secara manual dan harus diganti. |

2.3 Perhitungan Efisiensi Proses

2.3.1 Hukum Faraday I

Hukum Faraday I menyatakan bahwa jumlah massa zat yang dihasilkan di elektroda berbanding lurus dengan jumlah listrik yang digunakan. Hal ini dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$m = \frac{exit}{96500} \dots \dots \dots (2.17)$$

Keterangan :

- m : massa zat yang dihasilkan (gram)
- e : berat ekivalen
- i : kuat arus (A)
- t : waktu (s)

2.3.2 Hukum Coulomb

Besarnya listrik yang mengalir yang dinyatakan dalam Coulomb merupakan arus listrik dikalikan dengan waktu operasi. Hubungan muatan listrik dengan kuat arus dinyatakan dalam rumus berikut :

$$Q = I. t \dots \dots \dots (2.18)$$

- i : kuat arus (A)
- t : waktu (s)
- Q : muatan listrik (coloumb)

2.3.3 Konsumsi Energi Spesifik

Menurut Ilhan *et al.* (2008), kelayakan proses dalam aplikasi elektrokimia dapat dievaluasi dari efisiensi penurunan polutan dan dari aspek ekonomi kelayakan ditentukan oleh konsumsi energi spesifik. Penurunan konsentrasi polutan selama proses elektrokimia dapat dinyatakan dengan fungsi dari muatan listrik spesifik.

$$Q = \frac{J.A.t}{v} \dots \dots \dots (2.19)$$

Sedangkan kerapatan arus (J) adalah kuat arus listrik yang mengalir di area elektroda.

$$J = \frac{I}{A} \dots \dots \dots (2.20)$$

Oleh karena itu, muatan listrik spesifik dapat dicari melalui persamaan:

$$Q = \frac{I.t}{v} \dots \dots \dots (2.21)$$

Konsumsi energi spesifik (W) secara langsung berkaitan dengan muatan listrik spesifik (Q) dan tegangan listrik tertentu (V). Berikut ini merupakan persamaan konsumsi energi selama elektrolisis:

$$W = Q \cdot V \dots\dots\dots(2.22)$$

Keterangan :

- W = konsumsi energi spesifik (kWh/m³)
- Q = muatan listrik spesifik (kAh/m³)
- I = kuat arus listrik (A)
- J = kerapatan arus (A/m²)
- V = tegangan listrik (V)
- A = luas elektroda (m²)
- t = waktu operasi (s)
- V = volume elektrolit (L)

(Anglada *et al.*, 2009).

2.4 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu yang dijadikan sebagai acuan penelitian merupakan penelitian yang menggunakan elektrodialisis dalam recovery nutrisi dan oksidasi elektrokimia dalam penyisihan polutan organik pada lindi. Penelitian terdahulu tercantum pada Tabel 2.8.

Tabel 2. 8 Penelitian Terdahulu

| Penulis | Hasil Penelitian |
|-------------------------------|--|
| (Chiang <i>et al.</i> , 2001) | Proses oksidasi elektrokimia efektif baik untuk penyisihan COD maupun amonium di lindi TPA. Dengan melakukan elektrolisis hingga 3 jam dengan arus listrik sebesar 10 A/dm ² , sebesar 58,8% COD dan 78,6% amonium dapat disisihkan dengan oksidasi elektrokimia tunggal. Penyisihan yang lebih akan diperoleh dengan melakukan elektrolisis dengan jangka waktu yang lebih lama namun membutuhkan konsumsi energi yang lebih banyak. Oksidasi elektrokimia yang dikombinasikan dengan pra-pengolahan |

| Penulis | Hasil Penelitian |
|------------------------------|---|
| | lain seperti koagulasi dan adsorpsi menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan oksidasi elektrokimia saja. |
| (Perez <i>et al.</i> , 2012) | Ammonium dapat berhasil disisihkan dengan proses oksidasi elektrokimia pada air limbah yang mengandung ion klorida dengan menggunakan anoda <i>Boron-doped Diamond</i> (BDD). Dua variasi konsentrasi klorida diperoleh dari air limbah industri dan lindi. Dari penelitian ini gas nitrogen dan nitrat menjadi produk utama dari oksidasi amonium dari proses. Konsentrasi klorida yang lebih tinggi memiliki dampak positif pada kinetika reaksi penyisihan amonium dan pembentukan nitrogen. |
| (Wang <i>et al.</i> , 2015) | <i>Recovery</i> amonium dan fosfat yang terkandung dalam air limbah menggunakan prinsip elektrodialisis yang terintegrasi dengan reaktor <i>struvite</i> . Proses dilakukan secara kontinyu, dengan luas permukaan membran 80 cm ² dan variasi kuat arus 0-2 A selama 20 menit. Removal amonia 95,8 – 100% untuk debit 40ml/min dengan kuat arus optimum 1,4 A. |
| (Li <i>et al.</i> , 2015) | Kombinasi oksidasi elektrokimia dan proses kristalisasi magnesium potassium fosfat merupakan metode yang efektif dalam recycle konsentrat nanofiltrasi dari lindi. Kombinasi dari proses ini mampu menyisihkan polutan organik dan NH ₃ -N dengan reaksi yang dimediasi oleh klorin. Hasil penelitian menunjukkan penggunaan kembali konsentrat nanofiltrasi dengan elektrolisis <i>Cation Exchange Membrane</i> dan kristalisasi mampu dilakukan. |

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Deskripsi Umum

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efisiensi kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia dalam penurunan polutan organik dan menentukan potensi *recovery* nutrisi N dan P dari TPA Ngipik, Gresik. Selain itu, penelitian juga bertujuan untuk menghitung kebutuhan energi spesifik proses. Penelitian utama didahului dengan penelitian pendahuluan yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal limbah dan untuk menentukan durasi operasi reaktor, debit serta arus listrik yang digunakan. Variasi dilakukan pada variasi penambahan NaCl dan variasi pH awal proses.

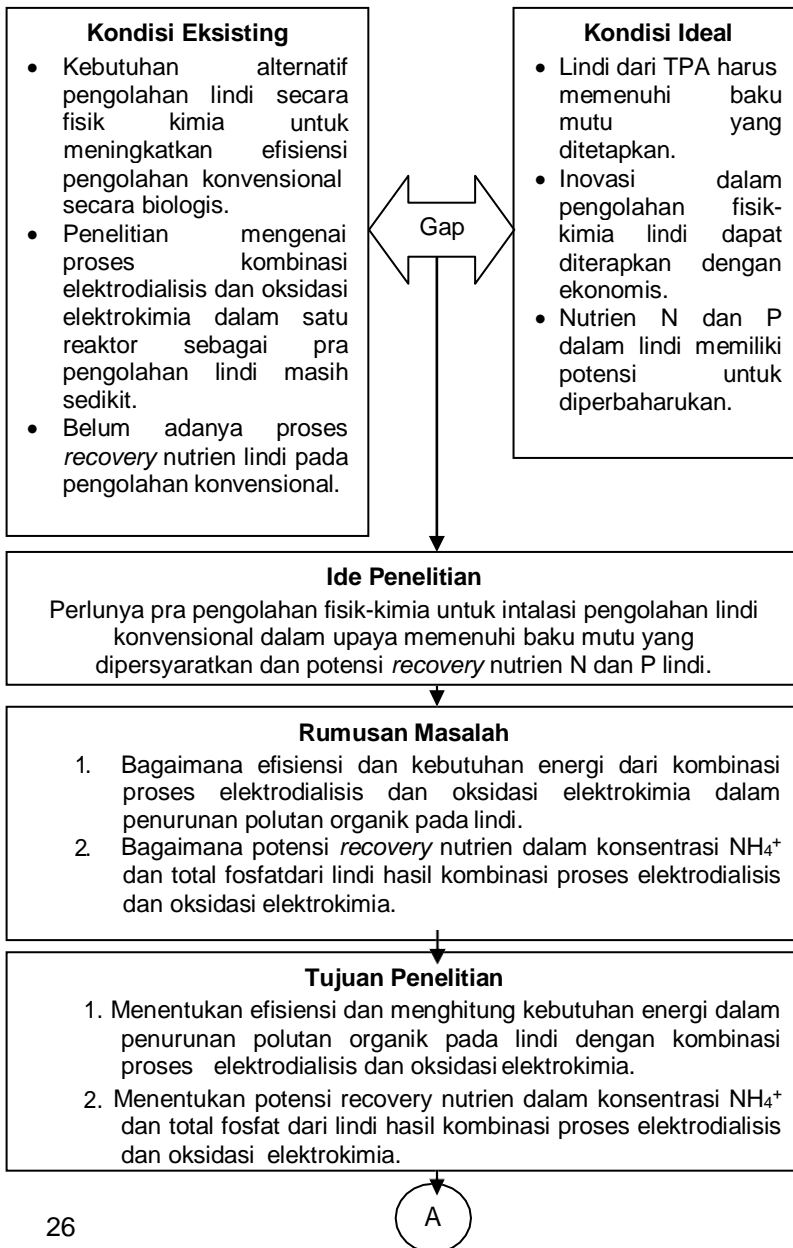
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

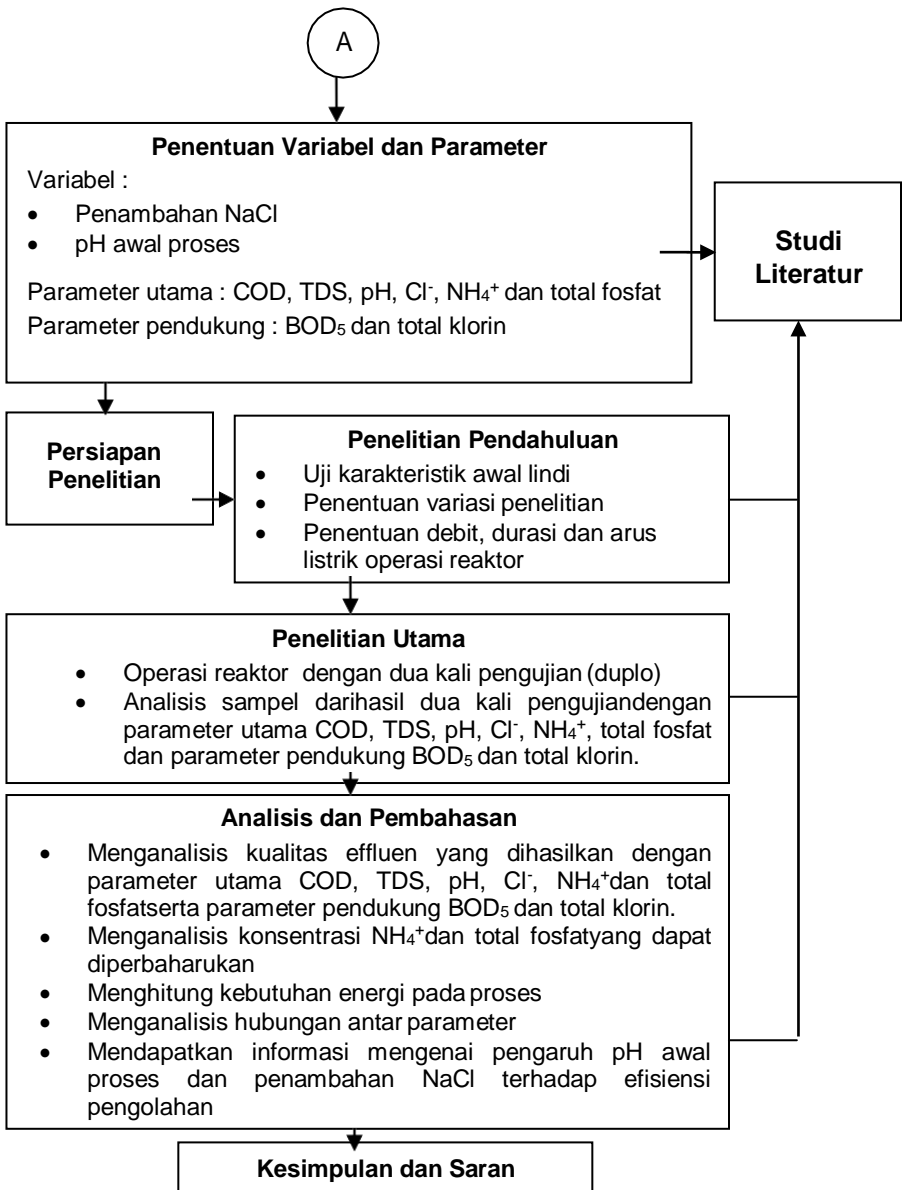
Lokasi pengambilan sampel adalah di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah Ngipik Gresik. Penelitian dilakukan di Laboratorium Pemulihan Air sedangkan operasi reaktor dilakukan di Workshop Teknik Lingkungan ITS. Penelitian dilakukan selama empat bulan dari bulan Februari sampai bulan Juni 2017.

3.3 Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian merupakan gambaran alur pikir penelitian ini. Penyusunan langkah-langkah penelitian yang jelas dan sistematis bertujuan untuk mempermudah pelaksanaan penelitian. Kerangka penelitian berisikan urutan langkah atau kegiatan yang akan dilakukan dalam penelitian yang meliputi ide penelitian, rumusan masalah, penentuan variabel dan parameter, pelaksanaan penelitian pendahuluan dan utama hingga analisis pembahasan dan kesimpulan.

Kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:





Gambar 3. 1 Kerangka Penelitian

A. Ide Penelitian

Hal yang mendasari adanya penelitian ini adalah adanya kebutuhan alternatif pengolahan lindi secara fisik kimia untuk meningkatkan efisiensi pengolahan konvensional secara biologis.

Penelitian mengenai proses kombinasi elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia dalam satu reaktor sebagai pra pengolahan lindi masih sedikit di Indonesia. Selain itu, diperlukan penelitian dalam *recovery* nutrisi yang ada pada lindi.

B. Studi Literatur

Studi literatur digunakan untuk menjadi dasar dalam melakukan penelitian. Berbagai informasi data dan sumber informasi didapatkan dari studi literatur ini. Studi literatur yang digunakan berasal dari jurnal ilmiah, buku teks, laporan tugas akhir, *thesis*, penelitian terdahulu, serta konsultasi dengan dosen terkait dengan topik penelitian. Hal-hal yang didapatkan dari studi literatur berupa:

- Karakteristik lindi
- Penyusunan desain kompartemen elektrodialisis
- Proses yang berlangsung pada oksidasi elektrokimia dan elektrodialisis serta faktor yang memengaruhi
- Uji kandungan NH_4^+ dan total fosfat pada hasil proses elektrodialisis
- Hubungan antar parameter uji dan variasi penelitian serta faktor-faktor yang mempengaruhi proses
-

C. Penentuan Variabel dan Parameter

Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

1. Salinitas awal lindi dengan penambahan NaCl

Penambahan NaCl berperan dalam proses tersedianya klorin sebagai mediator pada oksidasi tidak langsung. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan NaCl sebagai mediator oksidasi tidak langsung dalam efisiensi kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia. Variasi penambahan NaCl yang dilakukan adalah tanpa penambahan NaCl dan dengan penambahan NaCl. Pada penelitian Yashadi (2014) penambahan NaCl dilakukan pada

elektrolisis lindi Ngipik sebesar 2 g L^{-1} dan 4 g L^{-1} . Pada penambahan sebanyak 4 g L^{-1} produksi total klorin dan COD yang terukur rendah dibandingkan dengan penambahan NaCl 2 g L^{-1} .

Maka digunakan penambahan NaCl sebesar 1 g L^{-1} dan 2 g L^{-1} pada penelitian ini untuk mengetahui efisiensi alternatif kombinasi proses ini untuk lindi bersalinitas sebab mempengaruhi terbentuknya klorin sebagai mediator oksidasi tidak langsung.

2. pH awal proses

Nilai pH berpengaruh terutama pada proses oksidasi tidak langsung dengan mediator berupa klorida. pH berpengaruh pada laju oksidasi sebab menentukan spesies klor aktif yang muncul pada effluen. Evolusi klorin terjadi pada anoda tergantung pada nilai pHnya. Pada pH lebih rendah dari 3,3, spesies klor dominan yang aktif berupa Cl_2 dan pada pH yang lebih tinggi membentuk HClO pada $\text{pH} < 7,5$ (persamaan (2.4)) dan ClO^- pada $\text{pH} > 7,5$ (persamaan (2.5)). Pada prinsipnya operasi pada kondisi asam yang kuat menjadi pilihan yang paling baik di mana klorin menjadi oksidator paling kuat, diikuti oleh HClO (Canizares *et al.*, 2006).

Selain pengaruhnya terhadap terbentuknya klorin, pH berpengaruh pada kelarutan fosfat dan amonium. Berdasarkan kurva kelarutannya, konsentrasi fosfat akan bertahan dalam wujud terlarut pada pH maksimal 9 dan akan turun pada pH di atas 9. Sedangkan nitrogen dalam bentuk amonium akan dapat terukur hingga pH 11. Namun berdasarkan grafik persenyawaan amonium berdasarkan pH (Qiang dan Adams, 2004), pada pH 9,5 NH_4^+ menurun dan berpotongan dengan kenaikan NH_3 . Maka dibuat tiga variasi nilai pH yang sesuai dengan pertimbangan terbentuknya klorin dan kelarutan fosfat serta amonium. pH awal proses divariasikan yaitu sebesar 5,5; pH awal lindi dan 8,5.

Parameter utama yang digunakan pada penelitian ini antara lain COD, TDS, pH, Cl^- , NH_4^+ dan total fosfat. Sedangkan parameter pendukungnya adalah BOD_5 dan total klorin. Prosedur analisis masing-masing parameter dicantumkan dalam lampiran A. Pada Tabel 3.1 berikut ini merupakan metode pengukuran setiap parameter:

Tabel 3. 1 Metode Analisis Setiap Parameter

| No. | Parameter | Metode | Instrumen |
|-----|---|--------------------|-----------------------|
| 1 | COD | Titrimetri | Buret |
| 2 | TDS | Potensiometri | <i>Salinity meter</i> |
| 3 | pH | Potensiometri | pH meter |
| 4 | Cl ⁻ | Argentometrik Mohr | Buret |
| 5 | NH ₄ ⁺ | Nessler | Spektrofotometer |
| 6 | Total Fosfat (P ₂ O ₅) | Lorenz | Spektrofotometer |
| 7 | BOD ₅ | Titiasi | Winkler |
| 8 | Total klorin | DPD | Spektrofotometer |

Analisis COD pada salinitas tinggi > 2,000 mg/L dapat menimbulkan interferensi dalam analisis (Vyrides dan Stuckey, 2009) maka pada penelitian dilakukan pengenceran sebesar 20x untuk analisis COD dan klorida pada lindi awal sebelum dilakukan uji dan pada pengambilan sampel setelah jam ke-3 uji. Pada waktu pengambilan sampel selanjutnya dilakukan pengenceran sebanyak 10x. COD awal tidak menunjukkan banyak perubahan (<2 g) seiring variasi penambahan NaCl pada pH awal proses sama dengan pH asli lindi. Namun pada pH awal proses sama dengan 5,5 dan 8,5 terjadi peningkatan COD awal sebesar seiring penambahan NaCl yaitu mencapai > 2,5 g.

Oleh sebab itu selain pengenceran, upaya yang dapat dilakukan untuk mengurangi tingkat *error* pada analisis adalah dengan penambahan bubuk Hg₂SO₄ yang dibubuhkan (Freire dan Sant'anna, 1998). Maka, penambahan bubuk Hg₂SO₄ bertambah seiring penambahan variasi NaCl dan lebih banyak pada pH awal 5,5. Pada analisis parameter ammonium dan fosfat juga dilakukan pengenceran namun tidak menunjukkan pertambahan konsentrasi awal yang signifikan seiring penambahan variasi NaCl.

C. Persiapan Penelitian

Persiapan penelitian merupakan persiapan alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian.

Alat yang digunakan antara lain:

- a. Reaktor dengan sistem *batch* berupa reaktor dengan tiga kompartemen dengan dimensi masing-masing kompartemen 20 cm x 10 cm x 2 cm.
- b. Elektroda
Elektroda yang digunakan adalah *stainless steel* dengan dimensi 5 cm x 5 cm untuk katoda dan karbon dengan dimensi karbon 15 cm x 4 cm x 2 cm untuk anoda.
- c. Membran
Membran yang digunakan adalah *cation exchange membrane* (CEM/+) dengan tipe CMI 7000S dan *anion exchange membran* (AEM/-) dengan tipe AMI 7001S . Spesifikasi membrane yang digunakan disajikan pada Tabel 3.2.

Tabel 3. 2 Spesifikasi Membran yang Digunakan

| Spesifikasi Teknik | CMI – 7000S | AMI-7001S |
|--|-------------|------------|
| Ketebalan (mm) | 0,45±0.025 | 0,45±0,025 |
| Luas Hambatan (ohm cm ⁻²) | <30 | <40 |
| Densitas Arus Maksimal (A m ⁻²) | <500 | <500 |
| Total Exchange Capacity (meq g ⁻¹) | 1,6±0,1 | 1,3±0,1 |
| Stabilitas Temperatur Maksimal (°C) | 90 | 90 |

Sumber: USA : Membranes International Inc. (2016)

Sebelum digunakan untuk operasi reaktor, terlebih dahulu dilakukan *pre-conditioning* pada membran anion dan kation yaitu dengan merendam membran pada larutan NaCl 5% selama 12 jam.

- d. Pompa Peristaltik
Debit pompa peristaltik yang digunakan untuk operasi adalah sebesar 0,7mL s⁻¹.
- e. Kabel
Kabel digunakan untuk mengalirkan arus listrik ke masing-masing elektroda.
- f. DC Power Supply
DC *Adjustable Power Supply* yang digunakan adalah dengan arus listrik antara 0 - 3 A dan tegangan antara 0-

30 V. Alat ini berfungsi sebagai sumber listrik pada proses elektrodialisis.

- g. Selang
Selang untuk pengaliran menggunakan selang infus dengan diameter dalam 3 mm.
- h. *Magnetic Stirrer*
Magnetic Stirrer digunakan untuk menghomogenkan lindi pada *feed tank*.

Bahan yang digunakan antara lain:

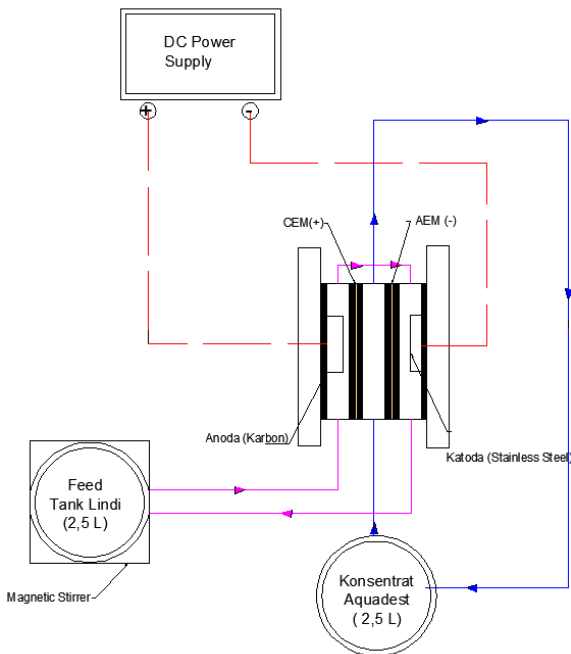
- a. Lindi TPA Ngipik Gresik
Volume lindi yang digunakan untuk proses elektrodialisis dengan sistem *batch* ditentukan sebanyak 2,5 L untuk setiap pengamatan. Lindi dari hasil pengambilan sampel dikompositkan dengan cara mencampurkannya dari berbagai wadah pengambilan sampel. Lindi terlebih dahulu disaring dengan kain.
- b. *Aquadest*
Aquadest digunakan sebagai pelarut ion yang tersisihkan selama proses elektrodialisis. *Aquadest* yang digunakan untuk sekali percobaan adalah 2,5 L.
- c. Larutan H_2SO_4 dan NaOH
Larutan H_2SO_4 dan NaOH digunakan untuk pengondisian variasi pH awal proses. Untuk pengondisian pH 5,5 digunakan 1,6 mL H_2SO_4 pekat 98%. Untuk pengondisian pH 8,5 digunakan 1,4 mL NaOH 2 N.
- d. Padatan NaCl
Padatan NaCl digunakan sebagai variasi penambahan NaCl. Untuk variasi penambahan NaCl ditimbang NaCl sesuai variasi dan dilarutkan pada lindi dengan *magnetic stirrer*.
- e. Larutan NaCl 5%
Larutan NaCl 5% digunakan untuk *pre-conditioning* membran.

D. Penelitian Pendahuluan

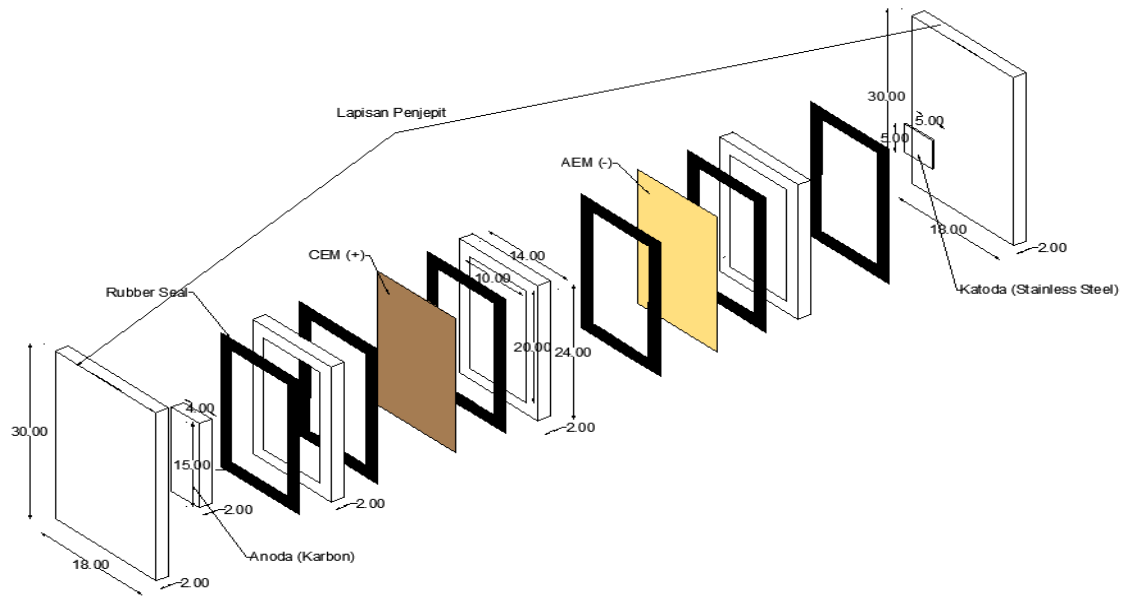
Penelitian ini akan dimulai dengan dilaksanakannya penelitian pendahuluan. Penelitian pendahuluan ini bertujuan untuk:

- a. Uji karakteristik awal lindi
Menganalisis parameter COD, TDS, pH, Cl^- , NH_4^+ , PO_4^{3-}
- b. Penentuan variasi percobaan
Mengukur pH awal dan Cl^- lindi untuk menentukan penambahan NaCl dan variasi pH awal proses.
- c. Penentuan waktu operasi, titik waktu pengambilan sampel dan kuat arus listrik yang digunakan

Pada penelitian ini digunakan tiga kompartemen yang terdiri dari dua jenis membran yaitu *anion exchange membrane* dan *cation exchange membrane*. Tujuan dari kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia pada pra-pengolahan ini adalah untuk menyisahkan polutan organik dan mendapatkan kembali nitrogen dan fosfat murni dalam konsentrasi NH_4^+ dan PO_4^{3-} . Gambar sistem elektrodialisis yang digunakan pada penelitian disajikan pada Gambar 3.2. Sedangkan gambar tiga



Gambar 3. 2 Diagram Sistem Elektrodialisis



Gambar 3. 3 Gambar Reaktor

E. Penelitian Utama

Dalam penelitian utama, dilakukan pengamatan sesuai waktu operasi yang ditentukan dari penelitian pendahuluan yaitu 12 jam. Dua variabel yang digunakan yaitu variasi penambahan NaCl dan variasi pH awal proses menghasilkan sembilan variasi sampel yang dihasilkan. Dalam penelitian ini, data diambil sebanyak dua kali (duplo). Pada pengamatan ini, digunakan sistem *batch*. Volume lindi yang digunakan pada satu siklus adalah 2,5 liter. Hal ini ditetapkan dengan mempertimbangkan jumlah sampel yang akan diambil selama proses berlangsung dan rasio antara volume total lindi dan volume efektif reaktor. Reaktor kontrol dilakukan pada pH 5,5 dan pH 8,5 tanpa dialiri arus listrik. Variasi dan reaktor dijelaskan pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3 Variasi Sampel Hasil Penelitian

| Penambahan NaCl / pH awal proses | pH awal proses | | | | | |
|---|--------------------------|---------------|-------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| | Reaktor penelitian utama | | | Reaktor kontrol | | |
| | 5,5 | pH asli lindi | 8,5 | 5,5 | pH asli lindi | 8,5 |
| | (A) | (B) | (C) | (K) | (K) | (K) |
| Tanpa Penambahan NaCl(A) | AA | AB | AC | AAK (Tanpa dialiri arus listrik) | ABK (Tanpa dialiri arus listrik) | ACK (Tanpa dialiri arus listrik) |
| Penambahan NaCl 1 g L ⁻¹ (B) | BA | BB | BC | BAK (Tanpa dialiri arus listrik) | | BCK (Tanpa dialiri arus listrik) |
| Penambahan NaCl 2 g L ⁻¹ (C) | CA | CB | CC | CAK (Tanpa dialiri arus listrik) | | CCK (Tanpa dialiri arus listrik) |

Sampling dilakukan pada setiap pengamatan sebanyak lima kali pada lima titik variasi waktu. Pada setiap kali pengambilan sampel dicatat arus listrik, tegangan listrik dan volume yang

tersisa pada titik sampling kompartemen berelektroda dan konsentrat untuk memudahkan perhitungan kesetimbangan massa. Waktu dan titik pengambilan sampel tertera pada Tabel 3.4.

Pada prosesnya, lindi akan dialirkan ke kompartemen berelektroda sedangkan kompartemen bagian tengah dialiri oleh *aquadest* sebagai pelarut ion. Prinsip kerjanya adalah ion-ion negatif (anion) yang terkandung pada lindi seperti PO_4 akan tertarik ke bagian anoda melalui *anion exchange membrane* sedangkan ion-ion positif (kation) seperti NH_4 akan tertarik ke bagian katoda dan melalui *cation exchange membrane*.

Titik pengambilan sampel adalah sebagai berikut :

Tabel 3. 4 Titik dan Waktu Pengambilan Sampel

| Parameter | Kebutuhan (mL) | Titik pengambilan sampel | Waktu pengambilan |
|-----------------|----------------|--|--------------------------------|
| COD | 5 | Kompartemen berelektroda | $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ |
| pH dan TDS | 20 | Kompartemen berelektroda dan kompartemen konsentrat (tengah) | $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ |
| Cl^- | 5 | Kompartemen berelektroda dan kompartemen konsentrat (tengah) | $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ |
| NH_4^+ | 5 | Kompartemen berelektroda dan kompartemen konsentrat (tengah) | $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ |
| Total Fosfat | 5 | Kompartemen berelektroda dan kompartemen konsentrat (tengah) | $t_0, t_1, t_2, t_3, t_4, t_5$ |
| BOD | 5 | Kompartemen berelektroda | t_0 dan t_5 |

| Parameter | Kebutuhan (mL) | Titik pengambilan sampel | Waktu pengambilan |
|--------------|----------------|--------------------------|-------------------|
| Total Klorin | 5 | Kompartemen berelektroda | t_3 dan t_5 |
| Total | 50 | | |

Pengambilan sampel untuk reaktor kontrol hanya dilakukan pada t_3 dan t_5 . Dalam sekali pengamatan dilakukan operasi tiga reaktor secara bersamaan untuk masing-masing variasi. Tiga reaktor tersebut merupakan reaktor kontrol, reaktor pengujian pertama dan reaktor pengujian duplo. Pengoperasian reaktor utama dan duplo secara bersamaan bertujuan untuk menjaga kualitas *feed* lindi yang sama.

Selama 12 jam proses elektrodialisis, diambil 5 sampel *time series*. t_1 dimulai setelah tiga jam pertama reaktor stabil di arus listrik 0,25 A. Pengambilan sampel berikutnya memiliki selisih 2,5 jam dari t_1 dan 1,5 jam dari t_4 ke t_5 . Data yang diperoleh adalah seperti yang disajikan pada Tabel 3.5 berikut:

Tabel 3. 5 Data Sampel Penelitian

| Variasi Sampel/ Waktu | Jam ke-0 | Jam ke-3 | Jam ke-6 | Jam ke-9 | Jam ke-12 | Jam ke-15 |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 |
| AA | AA ₀ | AA ₁ | AA ₂ | AA ₃ | AA ₄ | AA ₅ |
| BA | BA ₀ | BA ₁ | BA ₂ | BA ₃ | BA ₄ | BA ₅ |
| AB | AB ₀ | AB ₁ | AB ₂ | AB ₃ | AB ₄ | AB ₅ |
| BB | BB ₀ | BB ₁ | BB ₂ | BB ₃ | BB ₄ | BB ₅ |
| AC | AC ₀ | AC ₁ | AC ₂ | AC ₃ | AC ₄ | AC ₅ |
| BC | BC ₀ | BC ₁ | BC ₂ | BC ₃ | BC ₄ | BC ₅ |
| CA | CA ₀ | CA ₁ | CA ₂ | CA ₃ | CA ₄ | CA ₅ |
| CB | CB ₀ | CB ₁ | CB ₂ | CB ₃ | CB ₄ | CB ₅ |
| AAK | AAK ₀ | AAK ₁ | AAK ₂ | AAK ₃ | AAK ₄ | AAK ₅ |
| ABK | ABK ₀ | ABK ₁ | ABK ₂ | ABK ₃ | ABK ₄ | ABK ₅ |
| ACK | ACK ₀ | ACK ₁ | ACK ₂ | ACK ₃ | ACK ₄ | ACK ₅ |

| Variasi Sampel/ Waktu | Jam ke-0 | Jam ke-3 | Jam ke-6 | Jam ke-9 | Jam ke-12 | Jam ke-15 |
|--------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 0 | -1 | -2 | -3 | -4 | -5 |
| BAK | BAK ₀ | BAK ₁ | BAK ₂ | BAK ₃ | BAK ₄ | BAK ₅ |
| BCK | BCK ₀ | BCK ₁ | BCK ₂ | BCK ₃ | BCK ₄ | BCK ₅ |
| CAK | CAK ₀ | CAK ₁ | CAK ₂ | CAK ₃ | CAK ₄ | CAK ₅ |
| CCK | CCK ₀ | CCK ₁ | CCK ₂ | CCK ₃ | CCK ₄ | CCK ₅ |

F. Analisis dan Pembahasan

Analisis dan pembahasan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisis dan melakukan pembahasan terhadap kualitas effluen yang dihasilkan yaitu dari parameter utama yaitu COD, TDS, pH, Cl⁻, NH₄⁺ dan total fosfat serta parameter pendukung BOD₅ dan total klorin. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.
2. Menganalisis dan melakukan pembahasan pada pengaruh variasi pH awal proses dan penambahan NaCl terhadap efisiensi proses. Penyajian data dalam grafik dengan menggunakan Sigma Plot 12,5.
3. Menganalisis dan melakukan pembahasan terhadap konsentrasi NH₄⁺ dan total fosfat yang dapat diperbaharukan.
4. Menghitung kebutuhan energi proses dan menentukan kebutuhan energi proses optimum dengan cara :

$$W = Q \cdot V$$

Keterangan :

W = konsumsi energi spesifik (kWh/m³)

Q = muatan listrik spesifik (kAh/m³)

I = kuat arus listrik (A)

J = kerapatan arus (A/m²)

V = tegangan listrik (V)

| | | |
|---|---------------------|-------------------|
| A | = luas elektroda | (m ²) |
| t | = waktu operasi | (s) |
| v | = volume elektrolit | (L) |

(Anglada *et al.*, 2009).

Tegangan listrik dicatat setiap waktu pengambilan sampel. Energi spesifik proses dari setiap uji merupakan rata-rata konsumsi energi spesifik pada tiap pengambilan sampel.

Penyajian data untuk sumbu Y menggunakan rata-rata massa tiap parameter dari kedua uji dengan deviasi kecuali pada parameter BOD₅ dan total fofat hanya dari satu uji. Massa diperoleh dari konsentrasi dikalikan volume yang tersisa di reaktor ketika pengambilan sampel sesuai waktu dilakukan. Penyajian data untuk sumbu X merupakan muatan listrik spesifik yang dinyatakan dengan rumus:

$$Q = \frac{I \cdot t}{V}$$

Keterangan :

| | | |
|---|---------------------------|-----------------------|
| Q | = muatan listrik spesifik | (Ah L ⁻¹) |
| I | = kuat arus listrik | (A) |
| t | = waktu operasi | (jam) |
| V | = volume elektrolit | (L) |

(Anglada *et al.*, 2009).

D. Kesimpulan dan Saran

Hasil analisis data penelitian dan pembahasan melahirkan sebuah kesimpulan. Kesimpulan dibuat berdasarkan hasil analisis data penelitian dan pembahasan. Kesimpulan menjawab tujuan penelitian yang hendak dicapai. Kesimpulan berupa poin-poin yang disajikan secara singkat dan jelas.

Saran merupakan rekomendasi untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya. Tujuan dari rekomendasi tersebut adalah untuk menyempurnakan dan memperbaiki penelitian selanjutnya.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Penelitian Pendahuluan

Penelitian pendahuluan dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis karakteristik awal lindi, menentukan debit yang digunakan selama operasi reaktor, durasi operasi reaktor dan arus listrik dari *power supply* yang digunakan pada penelitian utama.

4.1.1 Karakteristik Awal Lindi

Lindi yang diambil dari TPA Ngipik Gresik memiliki karakteristik awal sebagai berikut :

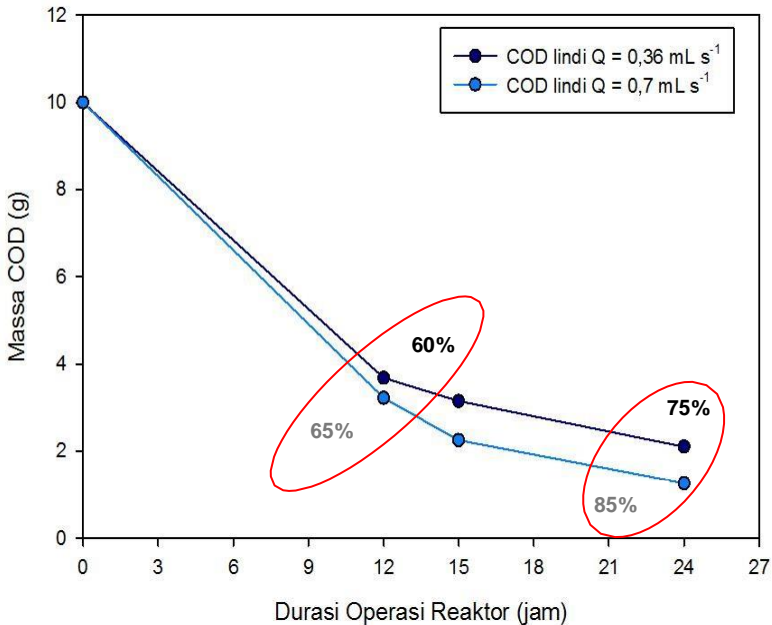
Tabel 4. 1 Karakteristik Awal Lindi

| Parameter | Konsentrasi | Satuan |
|-------------------------------|--------------------|--------------------|
| COD | 5.800,00 | mg L ⁻¹ |
| BOD | 124,32 | mg L ⁻¹ |
| Cl ⁻ | 2.268,00 | mg L ⁻¹ |
| TDS | 2.370,00 | mg L ⁻¹ |
| NH ₄ ⁺ | 213,21 | mg L ⁻¹ |
| PO ₄ ³⁻ | 21,80 | mg L ⁻¹ |
| pH | 7,67 | - |

4.1.2 Penentuan Debit, Arus Listrik dan Durasi Operasi

Variasi yang dilakukan pada penelitian pendahuluan adalah debit reaktor yaitu sebesar 0,36 mL s⁻¹ dan 0,7 mL s⁻¹ yang diatur dengan pompa peristaltik. Waktu operasi reaktor adalah selama 24 jam dengan pengambilan sampel pada jam ke-3 , 6, 9, 12, 15 dan 24. Arus listrik yang diterapkan pada penelitian pendahuluan ini adalah sebesar 0,3 A. Pada pengambilan sampel berdasarkan waktu dicatat arus listrik setiap pengambilan sampel. Analisis yang dilakukan meliputi parameter COD, TDS dan salinitas.

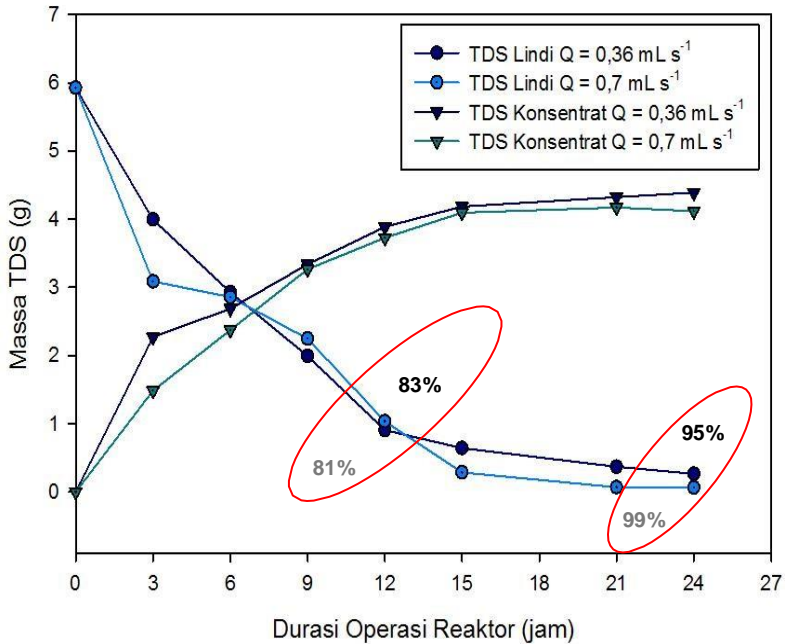
Dalam penyisihan COD dilakukan analisis pada jam ke 12, 15 dan 24 dengan hasil pada Gambar 4.1:



Gambar 4. 1 Penyisihan COD Penelitian Pendahuluan

Dari data tersebut diketahui bahwa penyisihan COD untuk debit $0,36 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 60%; 65% dan 75% berturut-turut setelah jam ke 12,15 dan 24 operasi reaktor. Untuk debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 65%, 75% dan 85% berturut-turut setelah jam ke 12,15 dan 24 operasi reaktor. Hal ini menunjukkan bahwa penyisihan massa COD lebih cepat terjadi pada saat operasi reaktor dengan debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$.

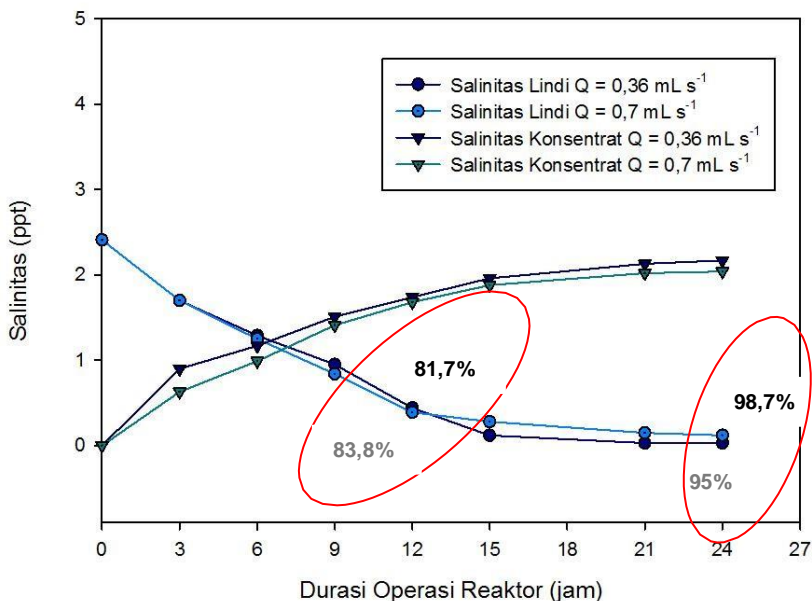
Selanjutnya TDS diukur dengan alat pH ion lab pada setiap jam pengambilan sampel yang tertera pada Gambar 4.2 berikut:



Gambar 4. 2 Penyisihan TDS Penelitian Pendahuluan

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa penyisihan TDS untuk debit $0,36 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 83%, 88%, 93% dan 95% berturut-turut pada jam ke-12,15, 21 dan 24. Sedangkan, penyisihan TDS untuk debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 81%, 94%, 98% dan 99% berturut-turut pada jam ke-12,15, 21 dan 24. Hal ini menunjukkan bahwa secara keseluruhan penyisihan massa TDS lebih besar pada operasi reaktor dengan debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$.

Penyisihan salinitas diukur dengan alat pH ion lab pada setiap jam pengambilan sampel yang tertera pada Gambar 4.3 berikut:



Gambar 4. 3 Penyisihan Salinitas Penelitian Pendahuluan

Dari data tersebut dapat diketahui bahwa penyisihan salinitas untuk debit $0,36 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 81,7%; 95%, 98,3% dan 98,7% berturut-turut pada jam ke-12,15, 21 dan 24. Sedangkan, penyisihan salinitas untuk debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$ adalah sebesar 83,8%; 88,3%, 93,7% dan 95% berturut-turut pada jam ke-12,15, 21 dan 24. Data hasil analisis dan pencatatan arus listrik pada penelitian pendahuluan terlampir pada Tabel LB. 1 – LB.4.

Hasil penelitian pendahuluan dengan debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$ memiliki efisiensi penyisihan sebesar 65% untuk COD, 81% untuk TDS dan 83,8% untuk salinitas hingga 12 jam operasi. Secara keseluruhan diperoleh efisiensi yang lebih besar pada operasi dengan debit $0,7 \text{ mL s}^{-1}$ dibandingkan dengan debit $0,36 \text{ mL s}^{-1}$. Pada pencatatan arus listrik di setiap pengambilan sampel diperoleh hasil yang sama pada kedua variasi debit yaitu setelah jam ke-12 arus listrik tidak konstan dan mulai turun dikarenakan

hambatan yang berkurang akibat penyisihan yang terjadi. Selain itu, arus 0,3 A tidak dapat stabil di angka 0,3 A pada salah satu *power supply*. Maka, dari efisiensi penyisihan COD, TDS, salinitas dan dengan mempertimbangkan kestabilan arus listrik maka ditetapkan untuk penelitian utama debit yang digunakan adalah sebesar 0,7 mL s⁻¹, durasi operasi reaktor selama 12 jam dan kuat arus listrik 0,25 A.

4.2 Penelitian Utama

Pelaksanaan penelitian utama bertujuan untuk mengetahui efisiensi penyisihan polutan organik dan potensi *recovery* ammonium (NH₄⁺) dan total fosfat. Selain itu penelitian juga bertujuan untuk menentukan kebutuhan energi dari kombinasi proses. Variasi yang digunakan adalah variasi kondisi pH awal proses yaitu sebesar 5,5 ; pH asli lindi dan 8,5. Variasi yang kedua adalah penambahan NaCl yaitu tanpa penambahan, dengan penambahan NaCl 1 g L⁻¹ dan dengan penambahan NaCl 2 g L⁻¹.

Tujuan dari variasi yang diterapkan adalah untuk mengetahui pengaruh pH awal proses pada persenyawaan ion-ion ammonium (NH₄⁺) dan fosfat (PO₄³⁻). dan penerapan proses pada lindi dengan penambahan salinitas. pH berpengaruh pada laju oksidasi sebab menentukan spesies klor aktif yang muncul pada efluen. Evolusi klorin terjadi pada anoda tergantung pada nilai pHnya. Pada pH lebih rendah dari 3,3, spesies klor dominan yang aktif berupa Cl₂ dan pada pH yang lebih tinggi membentuk HClO pada pH < 7,5 dan ClO⁻ pada pH > 7,5 (Canizares *et al.*, 2006).

Selain pengaruhnya terhadap terbentuknya klorin, pH berpengaruh pada kelarutan fosfat dan amonium. Berdasarkan kurva kelarutannya, konsentrasi fosfat akan bertahan dalam wujud terlarut pada pH maksimal 9 dan akan turun pada pH di atas 9. Sedangkan nitrogen dalam bentuk ammonium akan dapat terukur hingga pH 11. Namun berdasarkan grafik persenyawaan ammonium berdasarkan pH (Qiang dan Adams, 2004), pada pH 9,5 NH₄⁺ menurun dan berpotongan dengan kenaikan NH₃. Maka dibuat tiga variasi nilai pH yang sesuai dengan pertimbangan terbentuknya klorin dan kelarutan fosfat serta amonium. pH awal

proses divariasikan yaitu sebesar 5,5; pH awal lindi dan 8,5. Penambahan NaCl berperan dalam proses tersedianya klorin sebagai mediator pada oksidasi tidak langsung. Variasi ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penambahan NaCl sebagai mediator oksidasi tidak langsung dalam efisiensi kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia.

Penyajian data seluruh parameter uji merupakan rata-rata dari hasil analisis dua kali pengujian dengan standar deviasi kecuali pada parameter total fosfat dan BOD₅ hanya dilakukan analisis pada hasil uji pertama saja.

4.2.1. Hasil Proses Elektrodialisis

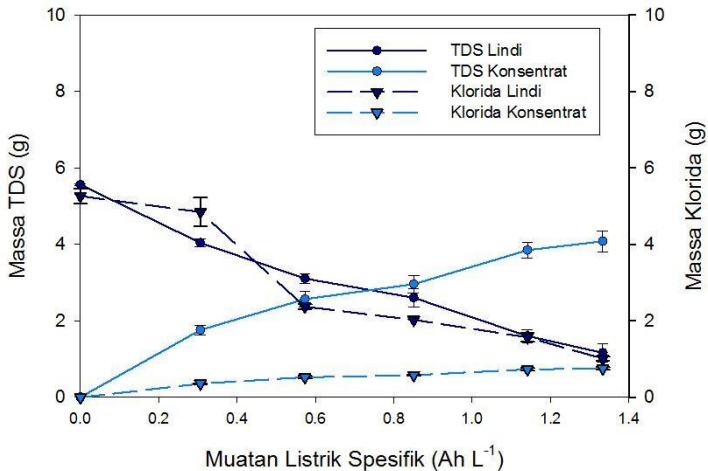
Pada proses elektrodialisis terjadi perpindahan kation dan anion dengan melewati membran anion dan membran kation. Dalam hal ini terjadi perpindahan kation Na⁺ dan NH₄⁺ dari kompartemen yang berisi lindi melalui membran kation menuju elektroda yang dialiri muatan listrik negatif (katoda) *stainless steel* dan tertangkap di kompartemen berisi *aquadest*. *Aquadest* selanjutnya disebut konsentrat karena telah menangkap ion-ion yang berpindah dari lindi. Perpindahan anion seperti Cl⁻ dan PO₄³⁻ terjadi melalui membran anion menuju elektroda yang bermuatan positif (anoda) karbon. Akibatnya, konsentrasi TDS, Cl⁻, ammonium (NH₄⁺) dan fosfat (PO₄³⁻) pada lindi akan berkurang sedangkan di konsentrat akan semakin tinggi karena menerima perpindahan ionnya seiring bertambahnya durasi operasi reaktor.

4.2.1.1 Penyisihan TDS dan Klorida

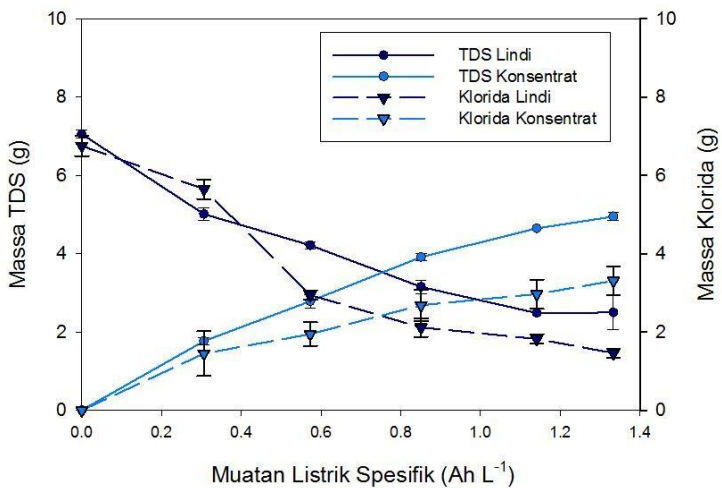
TDS pada lindi menunjukkan adanya garam inorganik, senyawa organik yang terlarut pada lindi. Semakin tinggi salinitas akibat makin tingginya TDS dapat meningkatkan toksisitas pada lindi sebab mampu merubah komposisi ion (Koshy *etal.*, 2008). Pengukuran TDS tidak membedakan ion (Weber-scannel dan Duffy, 2007). TDS dapat merupakan natrium (garam), kalsium, magnesium, kalium, karbonat, nitrat, bikarbonat, klorida dan sulfat (Hallock dan Hallock, 1993). TDS pada awal lindi meningkat seiring dengan penambahan NaCl yang diberikan. Pada kombinasi proses terjadi penurunan TDS pada lindi dan peningkatannya pada kompartemen berisi konsentrat.

NaCl pada lindi akan terionisasi menjadi Na⁺ dan Cl⁻. Analisis klorida dengan metode Argentometrik Mohr dilakukan untuk menentukan penyisihan klorida (Cl⁻) pada lindi dan

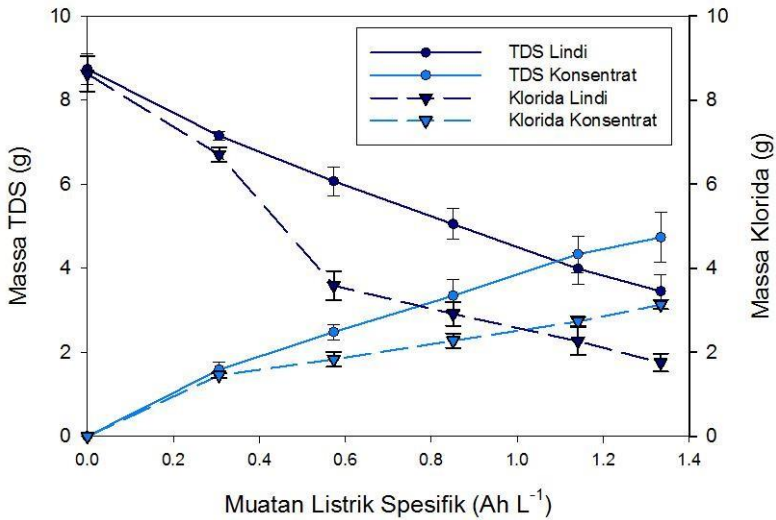
perpindahan ionnya ke kompartemen berisi konsentrat. Klorida mula-mula sampel juga akan meningkat seiring penambahan variasi NaCl yang diberikan. Penyisihan TDS dan klorida pada variasi penambahan NaCl pada pH asli lindi tertera pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.6:



Gambar 4. 4 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 5 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

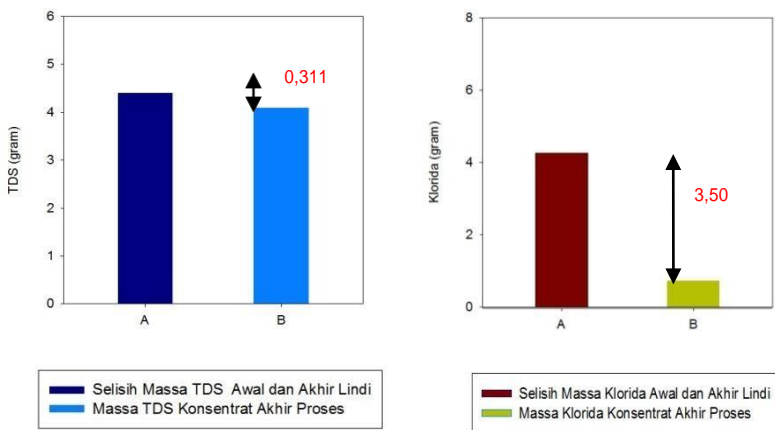


Gambar 4. 6 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

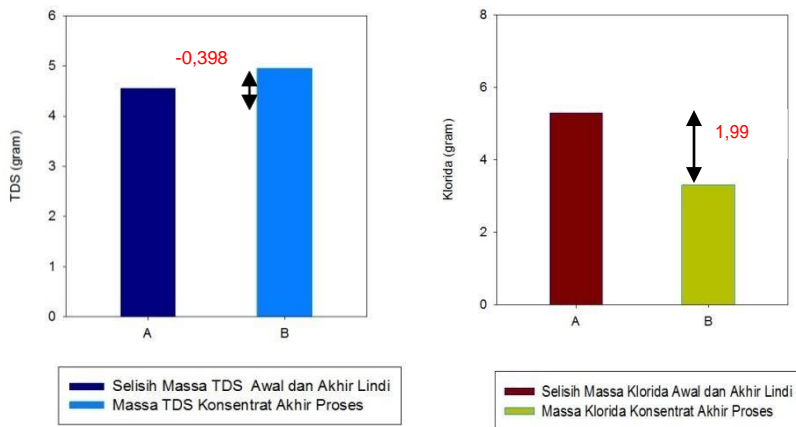
Data hasil analisis TDS terlampir pada Lampiran B Tabel LB. 23 hingga LB. 31 dan data analisis klorida pada Lampiran B Tabel LB. 32 hingga LB. 40. Pada variasi kondisi pH awal proses adalah pH awal lindi menunjukkan penyisihan TDS sebesar 79,01(4,39 gram) hingga jam ke-12 pada muatan listrik spesifik sebesar 1,33 Ah L⁻¹ tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan TDS pada lindi adalah sebesar 64,56% (4,55 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 60,47% (5,28 gram).

Sedangkan penyisihan klorida lindi sebesar 80,77% (4,253 gram) hingga jam ke-12 pada muatan listrik spesifik sebesar 1,33 Ah L⁻¹ tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan klorida pada lindi adalah sebesar 78,40% (5,292 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 79,61% (6,868 gram). Adanya peningkatan massa TDS dan klorida yang disisihkan pada variasi penambahan NaCl disebabkan oleh makin banyaknya konsentrasi NaCl yang

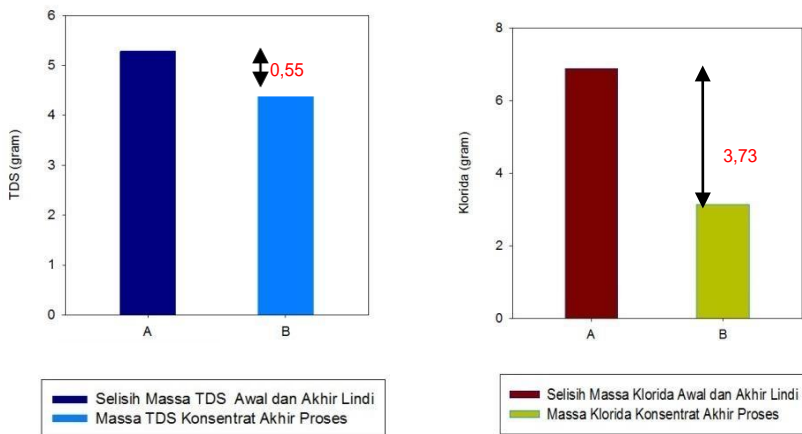
ditambahkan. Pada reaktor kontrol tidak terjadi penyisihan TDS namun terjadi sedikit penyisihan klorida (< 1 gram). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya arus listrik tidak terjadi perpindahan ion yang terukur sebagai TDS. Penyisihan klorida pada reaktor kontrol dimungkinkan terjadi akibat terkonversinya klorida dalam bentuk lain. Selisih massa klorida awal lindi dan akhir lindi lebih besar dari yang ada di konsentrat hingga jam terakhir pengambilan sampel. Hal ini menunjukkan bahwa tidak seluruh TDS dan klorida mengalami mobilisasi ke kompartemen konsentrat dari lindi hingga pada jam terakhir operasi reaktor 12 jam. Berikut ini merupakan grafik kesetimbangan massa dari massa TDS dan klorida pada variasi pH awal proses sama dengan pH asli lindi = 7,85 dengan variasi penambahan NaCl di jam terakhir operasi reaktor:



Gambar 4. 7 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Tanpa Penambahan NaCl



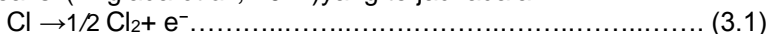
Gambar 4. 8 Keseimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 9 Keseimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Angka yang tertera di atas diagram batang massa TDS dan klorida konsentrat merupakan perbedaan antara selisih massa yang diukur di awal dan akhir proses pada lindi (penyisihan massa TDS dan klorida pada lindi) dengan massa yang mampu ditangkap konsentrat hingga akhir proses. Angka ini menunjukkan massa yang hilang dari TDS dan klorida yang tidak tertangkap konsentrat namun tersisihkan dari lindi. Massa yang hilang ini dapat terjadi akibat konversi TDS dan klorida ke bentuk persenyawaan lain.

Pada pengukuran pH lindi hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari pH aslinya yaitu $\pm 7,85$ hingga pH $7,17-7,52$. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adakah HOCl dan ClO^- . Pengukuran pH dapat dilihat pada lampiran B Tabel LB. 14 – LB. 22. Maka kemungkinan reaksi (Anglada *et al.*, 2011) yang terjadi adalah:

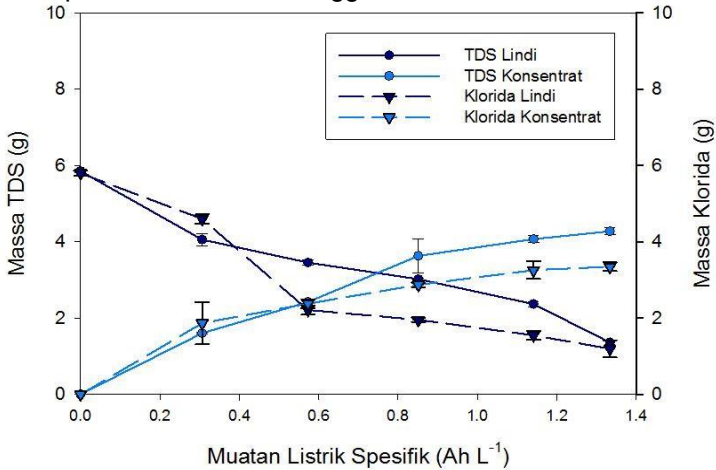


Pada variasi penambahan NaCl sebesar 1 g L^{-1} menunjukkan perbedaan dengan nilai negatif disebabkan nilai rata-rata massa pada konsentrat yang besar. Namun pada data sebelum dirata-rata tidak menunjukkan nilai negatif yang berarti tetap ada massa yang hilang dan tidak melebihi selisih yang ada pada lindi.

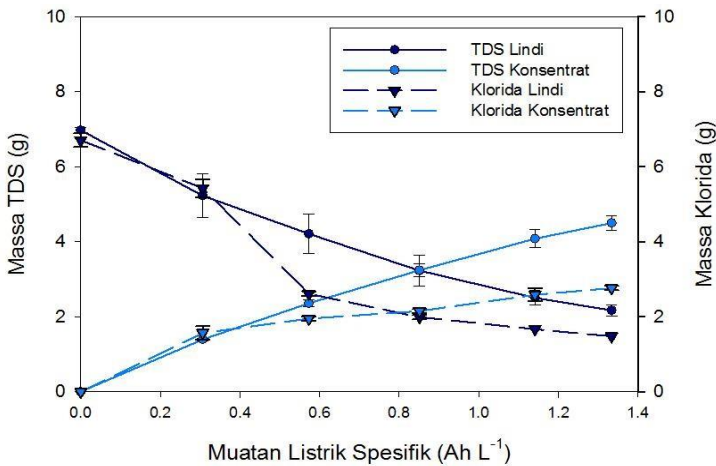
Adanya proses elektrodialisis hingga jam terakhir operasi ditandai dengan massa TDS dan klorida yang tertangkap di konsentrat hingga jam terakhir. Pada variasi pH awal proses = pH asli lindi ini, massa TDS terpindahkan ke konsentrat paling besar terjadi pada saat penambahan $1 \text{ gram NaCl L}^{-1}$ yaitu mencapai $4,95 \text{ gram}$ lalu menurun ke angka $4,74 \text{ gram}$ pada saat penambahan $2 \text{ gram NaCl L}^{-1}$.

Massa klorida terpindahkan ke konsentrat paling besar terjadi pada saat penambahan $1 \text{ gram NaCl L}^{-1}$ yaitu mencapai $3,30 \text{ gram}$ lalu menurun ke angka $3,14 \text{ gram}$ pada saat penambahan $2 \text{ gram NaCl L}^{-1}$.

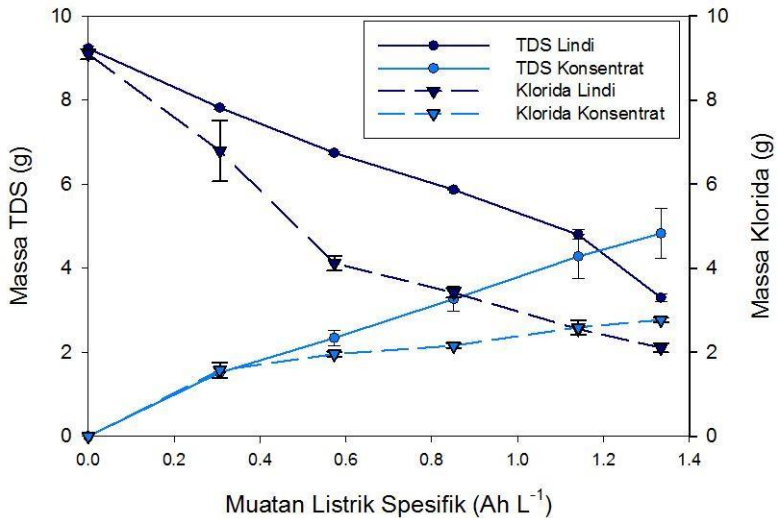
Selanjutnya dilakukan variasi penambahan NaCl yang sama namun dengan pH awal proses 5,5 dengan penyisihan tertera pada Gambar 4.10 hingga Gambar 4.12 berikut:



Gambar 4. 11 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 10 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan 1 g NaCl L⁻¹



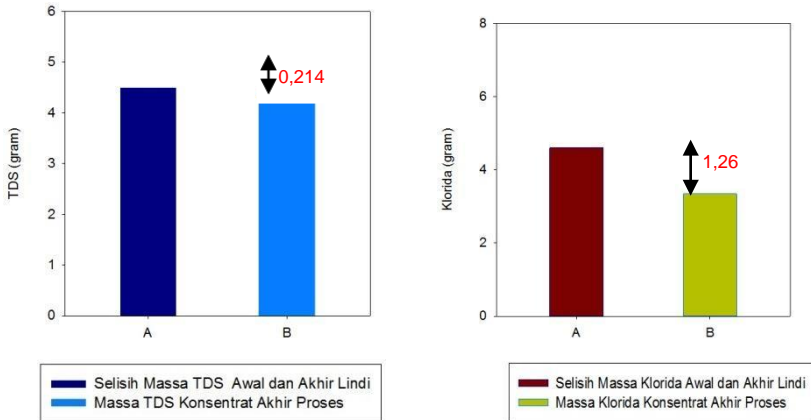
Gambar 4. 12 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 5,5 menunjukkan penyisihan TDS sebesar 76,73% (4,49 gram) hingga jam ke-12 operasi reaktor tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan TDS pada lindi adalah sebesar 68,87%(4,80 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 64,27% (5,93 gram).

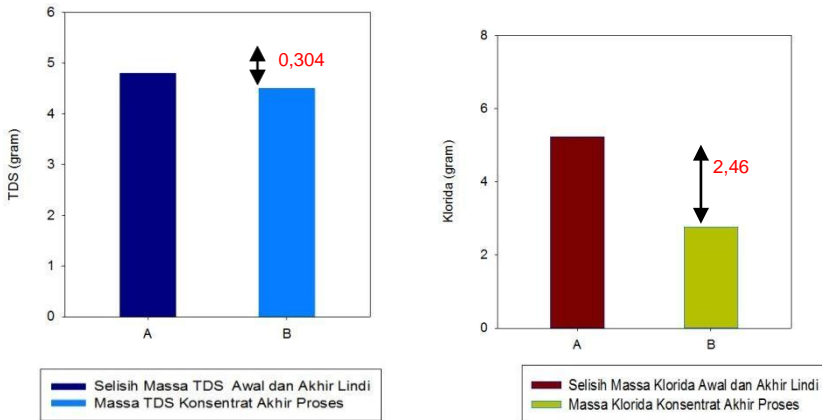
Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 5,5 menunjukkan penyisihan klorida sebesar 79,39% (4,602 gram) hingga jam ke-12 operasi reaktor tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan klorida pada lindi adalah sebesar 77,94% (5,229 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 76,86% (6,987 gram).

Massa TDS dan klorida yang tersisihkan meningkat di setiap variasi penambahan NaCl karena seiring dengan penambahan NaCl maka semakin banyak pula Na⁺ dan Cl⁻ yang tersedia pada sistem.

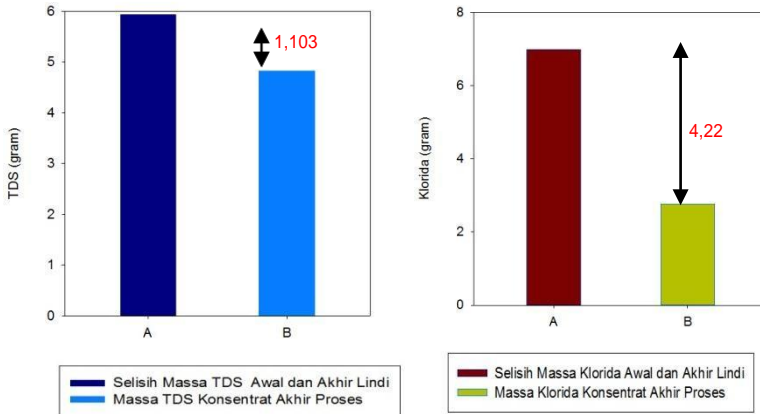
Grafik kesetimbangan massa TDS dan klorida pada variasi pengondisian pH awal proses = 5,5 dan variasi penambahan NaCl adalah sebagai berikut:



Gambar 4. 13 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 14 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 15 Kesenjangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada reaktor kontrol tidak terjadi penyisihan TDS namun terjadi sedikit penyisihan klorida (<1,5 gram). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya arus listrik tidak terjadi perpindahan ion yang terukur sebagai TDS. Penyisihan klorida pada reaktor kontrol dimungkinkan terjadi akibat terkonversinya klorida dalam bentuk lain.

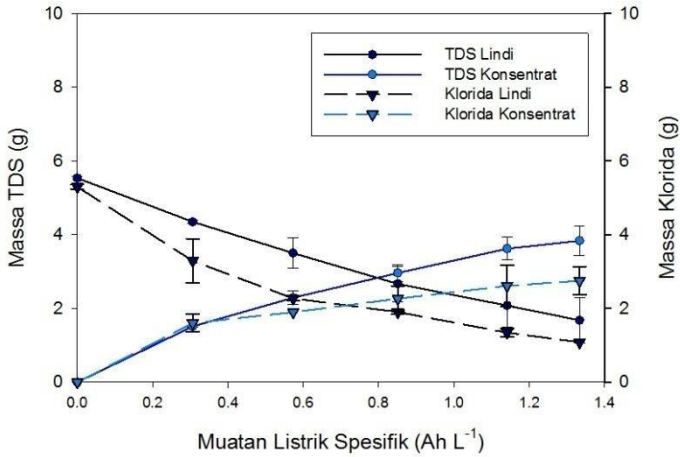
Pada pengukuran pH hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari ±5,50 hingga 4,01-4,36. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adalah HOCl. Maka kemungkinan reaksi (Anglada *et al.*, 2011) yang terjadi adalah:



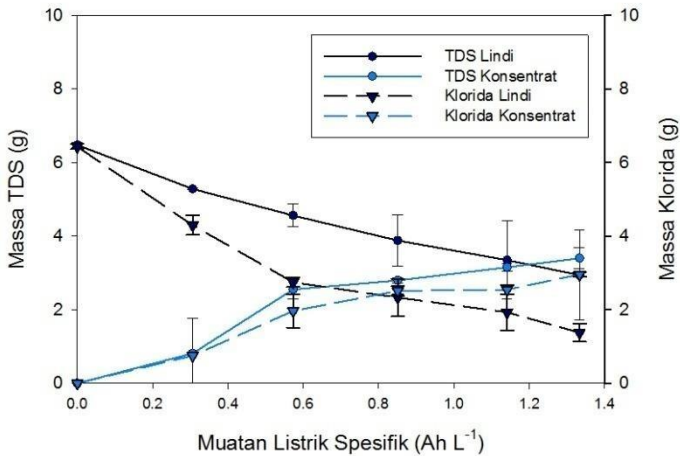
Proses elektrodialisis hingga jam terakhir operasi ditandai dengan massa TDS dan klorida yang tertangkap di konsentrat pada jam terakhir. Pada variasi pH awal proses = 5,5 ini massa TDS berpindah ke konsentrat paling besar terjadi pada saat penambahan 2 gram NaCl L⁻¹ yaitu mencapai 4,83 gram. Massa klorida berpindah ke konsentrat paling besar terjadi pada saat tanpa penambahan 1 gram NaCl L⁻¹ yaitu mencapai 3,35 gram

lalu menurun ke angka 2,77 gram pada saat penambahan 2 gram NaCl L⁻¹.

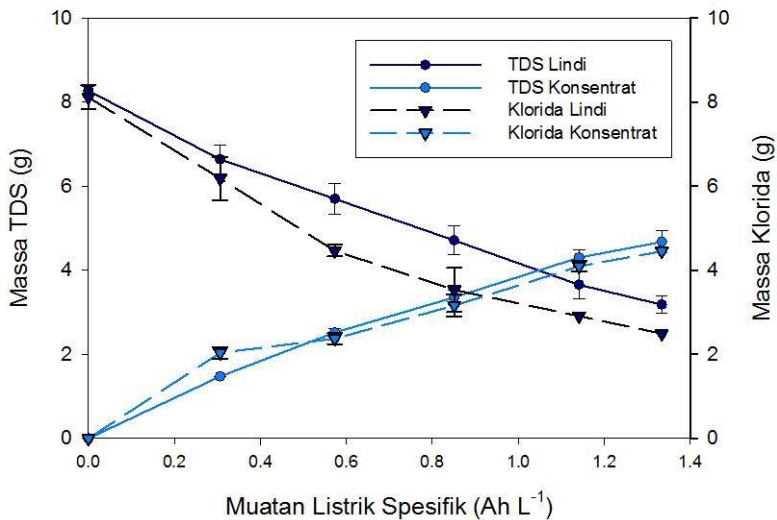
Selanjutnya dilakukan variasi pH awal proses = 8,5 dengan hasil analisis TDS dan klorida pada Gambar 4.16 hingga 4.18 berikut:



Gambar 4. 16 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 17 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

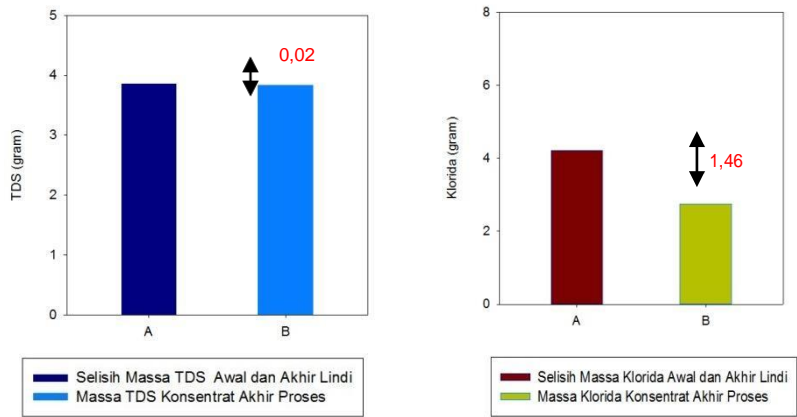


Gambar 4.18 Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

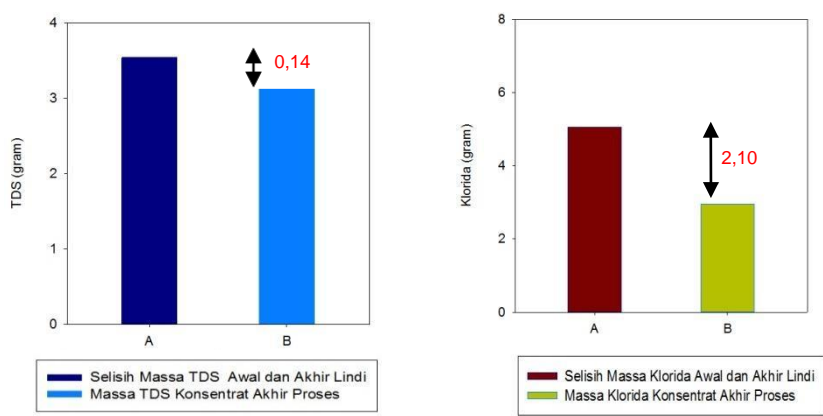
Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 8,5 menunjukkan penyisihan TDS sebesar 69,65% (3,86 gram) hingga jam ke-12 operasi reaktor tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan TDS pada lindi adalah sebesar 54,64% (3,54 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 61,53% (5,09 gram). Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 8,5 menunjukkan penyisihan klorida sebesar 79,51% (4,216 gram) hingga jam ke-12 operasi reaktor tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan klorida pada lindi adalah sebesar 78,67% (5,057 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 69,27% (5,624 gram).

Pada reaktor kontrol tidak terjadi penyisihan TDS namun terjadi sedikit penyisihan klorida (<1,5 gram). Massa TDS dan klorida yang tersisihkan meningkat di setiap variasi penambahan NaCl karena seiring dengan penambahan NaCl maka semakin banyak pula Na⁺ dan Cl⁻ yang tersedia pada sistem.

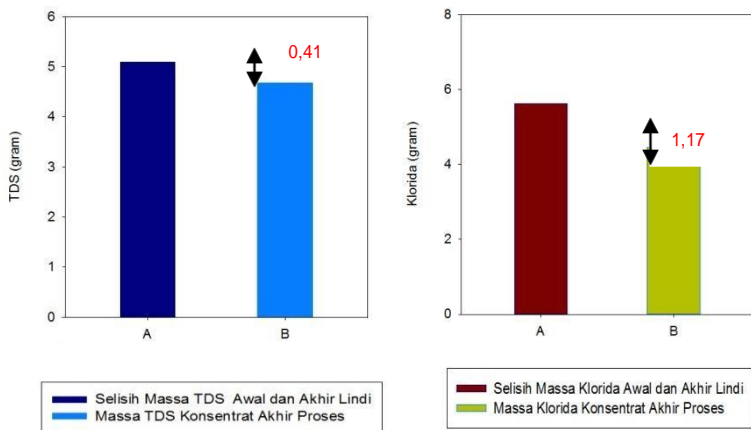
Grafik kesetimbangan massa TDS dan klorida pada variasi pengondisian pH awal proses = 5,5 dan variasi penambahan NaCl tertera pada Gambar 4.19 hingga 4.21 sebagai berikut:



Gambar 4. 19 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 20 Kesetimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 21 Keseimbangan Massa Penyisihan TDS dan Klorida pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada pengukuran pH hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari ±8,50 hingga 6,71-7,55. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adalah ClO⁻. Maka kemungkinan reaksi (Anglada *et al.*, 2011) yang terjadi adalah:



Proses elektrodialisis hingga jam terakhir operasi ditandai dengan massa TDS dan klorida yang tertangkap di konsentrat pada jam terakhir. Pada variasi pH awal proses = pH 8,5 ini, massa TDS dipindahkan ke konsentrat terbesar mencapai 4,68 gram saat penambahan 2 gram NaCl L⁻¹. Massa klorida dipindahkan ke konsentrat meningkat dari 2,75 gram saat tanpa penambahan NaCl hingga 4,46 gram saat penambahan 2 gram NaCl L⁻¹.

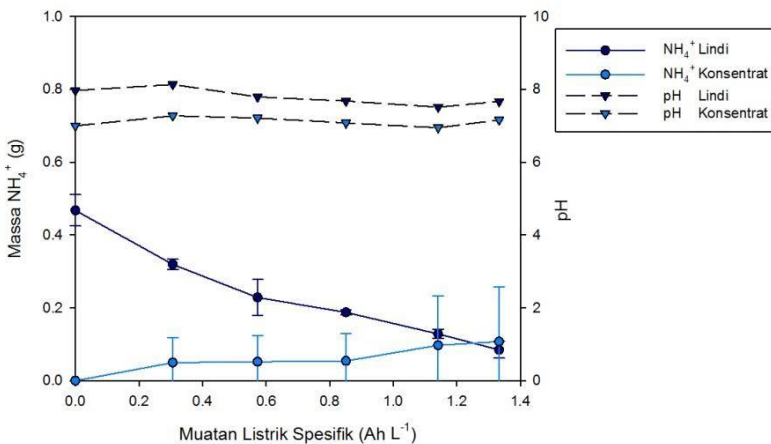
Dari keseluruhan variasi pH awal proses, penyisihan TDS dan klorida paling besar terjadi pada rangkaian pH awal proses dikondisikan = 5,5. Perpindahan TDS ke kompartemen konsentrat secara keseluruhan paling efektif pada pH awal proses dikondisikan sebesar 5,5 sedangkan perpindahan ion Cl⁻ paling efektif pada variasi pH = 8,5. Massa klorida yang hilang (terkonversi) paling besar pada pH awal proses = pH asli lindi =

7,85. Dengan melihat perbandingan massa TDS dan klorida yang hilang dan yang tertangkap di konsentrat dapat dilihat bahwa massa yang tertangkap di konsentrat hingga jam terakhir operasi reaktor lebih besar dari yang hilang atau terkonversi maka proses dominan dalam penyisihan TDS dan klorida pada lindi adalah melalui proses elektrodialisis.

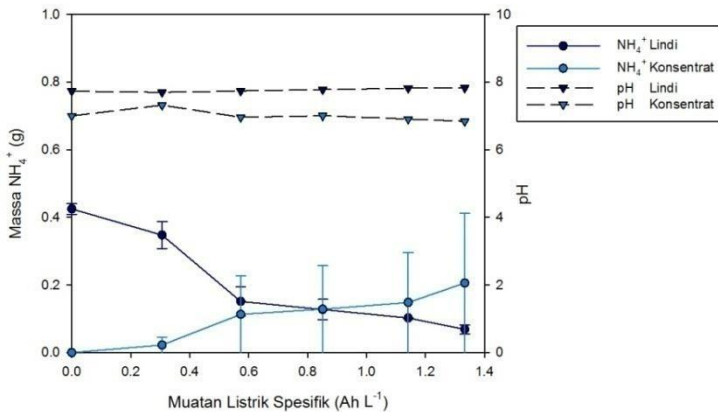
4.2.1.2 Penyisihan Ammonium

Seperti halnya dengan TDS dan ion klorida, kation NH_4^+ juga akan mengalami perpindahan menuju katoda melewati membran kation. Hal ini menyebabkan konsentrasi ammonium pada lindi berkurang sedangkan pada konsentrat akan bertambah seiring bertambahnya waktu operasi elektrodialisis.

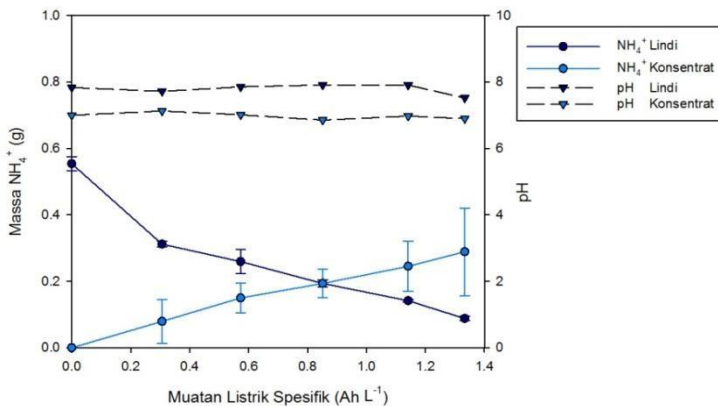
Analisis konsentrasi ammonium menggunakan metode Nessler. Data hasil analisis ammonium terlampir pada Lampiran B Tabel LB. 50 – LB. 58 sedangkan data hasil pengukuran pH tertera pada B Tabel LB. 14 – LB. 22. Berikut pada Gambar 4.22 hingga 4.24 merupakan penyisihan ammonium dan perpindahan ionnya ke kompartemen konsentrat pada pH asli lindi:



Gambar 4. 22 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 23 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

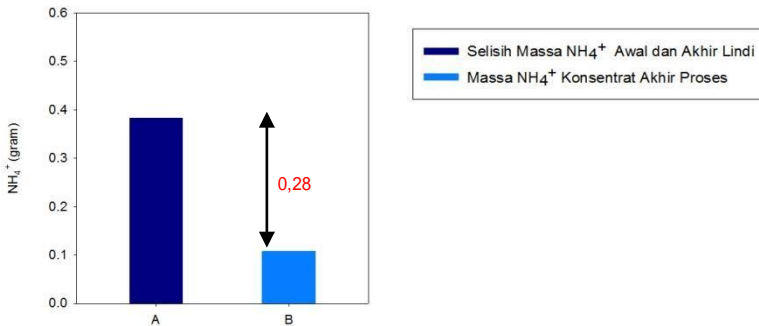


Gambar 4. 24 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

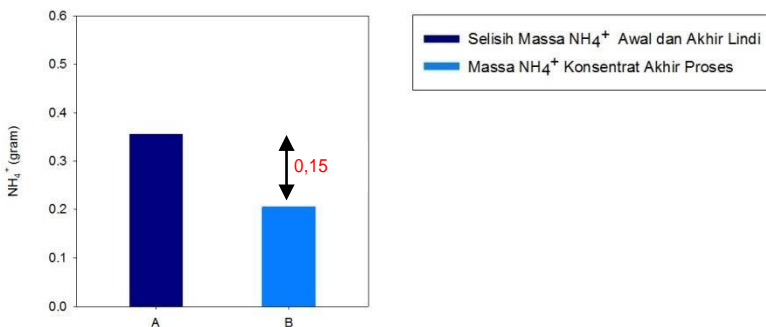
Pada kondisi pH awal proses adalah pH awal lindi menunjukkan penyisihan ammonium lindi sebesar 81,85% (0,383 gram) hingga jam ke-12 pada muatan listrik spesifik sebesar 1,33 Ah L⁻¹ tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan NaCl 1 g L⁻¹ penyisihan ammonium pada lindi adalah sebesar 83,81% (0,356 gram) dan pada penambahan NaCl 2 g L⁻¹ mencapai 84,09% (0,466 gram).

Pada reaktor kontrol terjadi sedikit penurunan massa ammonium (kurang dari 0,1 gram). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya arus listrik ion NH_4^+ sulit berpindah melalui membran kation.

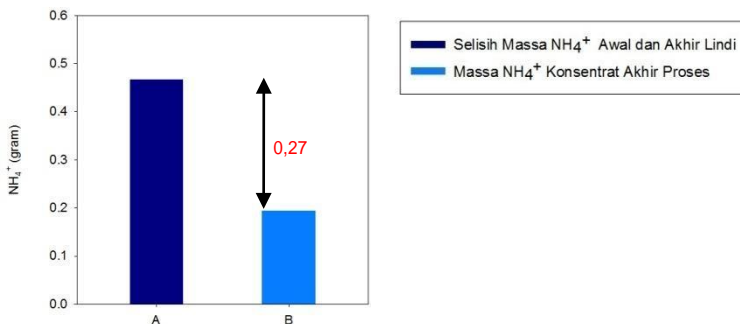
Selanjutnya dilakukan pengolahan data kesetimbangan massa yang merupakan perbedaan antara selisih massa ammonium awal dan akhir proses dengan ammonium yang mampu tertangkap konsentrat hingga akhir proses. Berikut ini pada Gambar 4.25 hingga 4.27 merupakan grafik kesetimbangan massa pada jam ke-12 operasi reaktor:



Gambar 4. 25 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 26 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl g L^{-1}

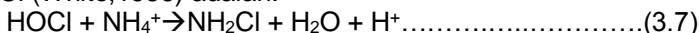


Gambar 4. 27 Kesesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Potensi *recovery* ammonium rata-rata dari variasi pH asli lindi adalah sebesar 0,17 gram. Massa ammonium yang teranalisis di konsentrat hingga jam terakhir lebih kecil dari massa ammonium awal lindi. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua ammonium lindi mampu tersisihkan hingga operasi reaktor berakhir.

Angka yang tertera di atas diagram batang massa ammonium konsentrat merupakan perbedaan antara selisih massa yang diukur di awal dan akhir proses pada lindi dengan massa yang mampu ditangkap konsentrat hingga akhir proses. Angka ini menunjukkan massa yang hilang dari ammonium yang tidak tertangkap konsentrat namun tersisihkan dari lindi. Hilangnya massa ammonium dapat diakibatkan ammonium terkonversi ke persenyawaan lain sehingga tidak terukur sebagai ammonium.

Pada pengukuran pH lindi hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari $\pm 7,85$ hingga 7,17-7,52. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adakah HOCl dan ClO⁻. Maka kemungkinan reaksi yang terjadi dengan HOCl (White,1986) adalah:

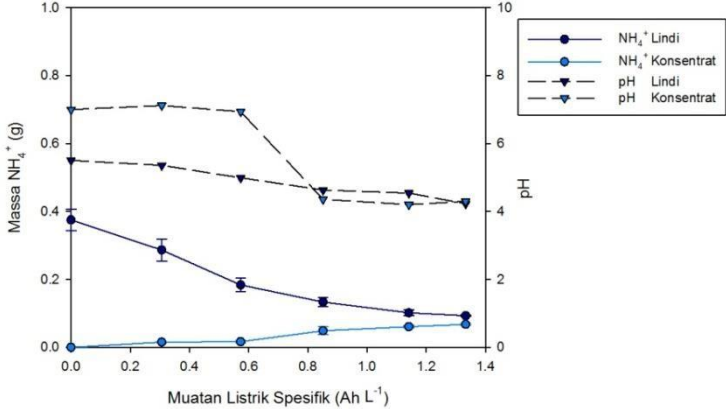


Berikut merupakan reaksi ammonium dengan hipoklorit :

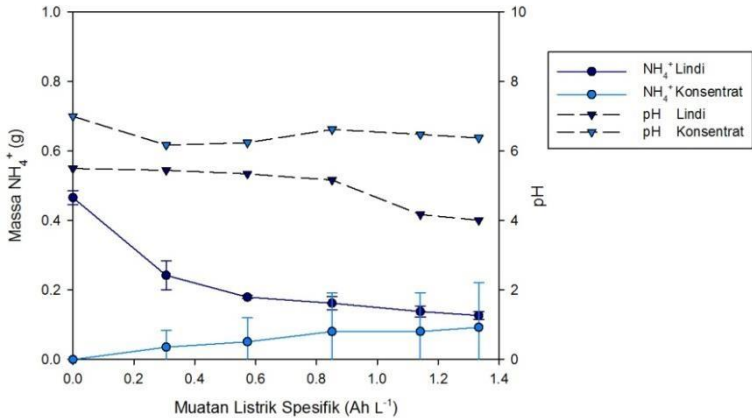


Adanya proses elektrodialisis hingga jam terakhir operasi ditandai dengan massaammonium yang tertangkap di konsentrat pada jam terakhir. Pada variasi pH awal proses = pH asli lindi ini, massa ammonium terpindahkan ke konsentrat terbesar mencapai 0,21 gram saat penambahan 1 gram NaCl L⁻¹ dan turun ke 0,19 gram saat penambahan 2 gram NaCl L⁻¹.

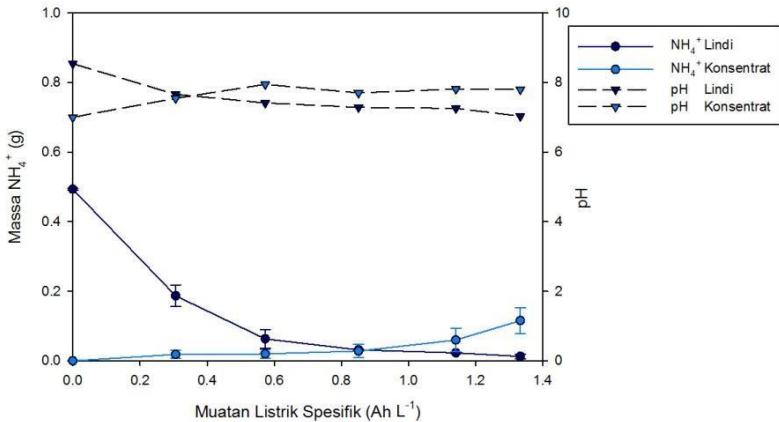
Selanjutnya pada Gambar 4.28 hingga 4.30 adalah variasi yang dilakukan untuk pH awal proses 5,5 dengan penyisihan sebagai berikut:



Gambar 4. 28 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 29 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



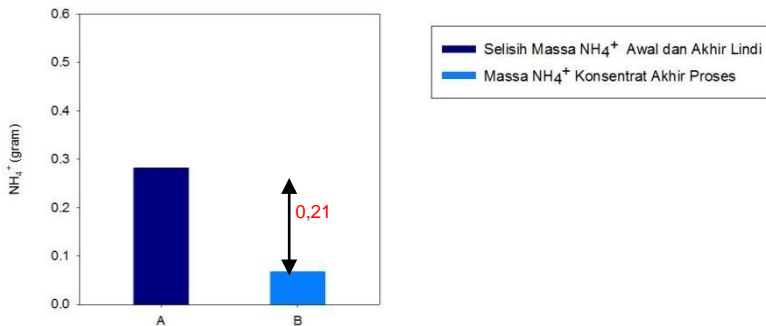
Gambar 4. 30 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L^{-1}

Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 5,5 menunjukkan penyisihan ammonium sebesar 75,19% (0,282 gram) hingga jam ke-12 operasi reaktor tanpa penambahan NaCl.

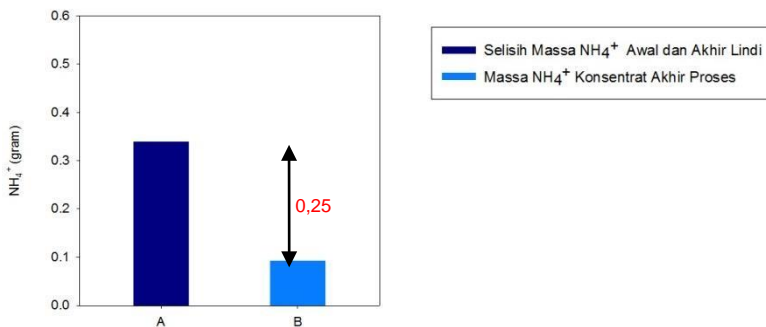
Pada penambahan 1 g NaCl L^{-1} penyisihan ammonium pada lindi adalah sebesar 72,81% (0,339 gram) dan pada penambahan 2 g NaCl L^{-1} mencapai 77,84% (0,389 gram).

Pada reaktor kontrol terjadi sedikit penurunan massa ammonium (kurang dari 0,1 gram). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya arus listrik ion NH_4^+ sulit mengalami perpindahan melalui membran kation.

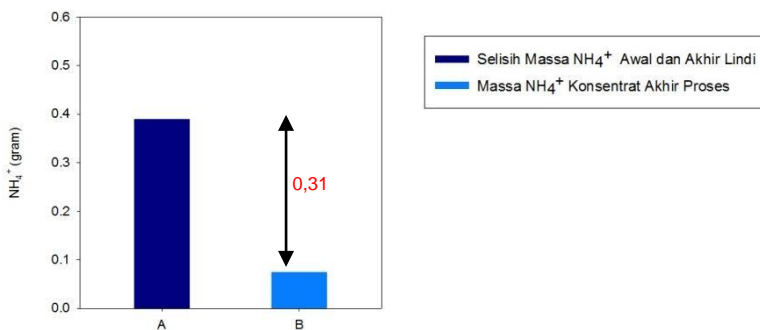
Selanjutnya dilakukan pengolahan data kesetimbangan massa untuk variasi pH awal proses 5,5 yang tertera pada Gambar 4.31 hingga 4.33 berikut:



Gambar 4. 31 Keseimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl



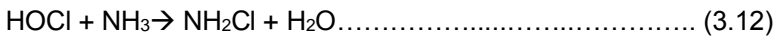
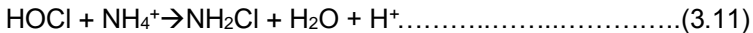
Gambar 4. 33 Keseimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 32 Keseimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

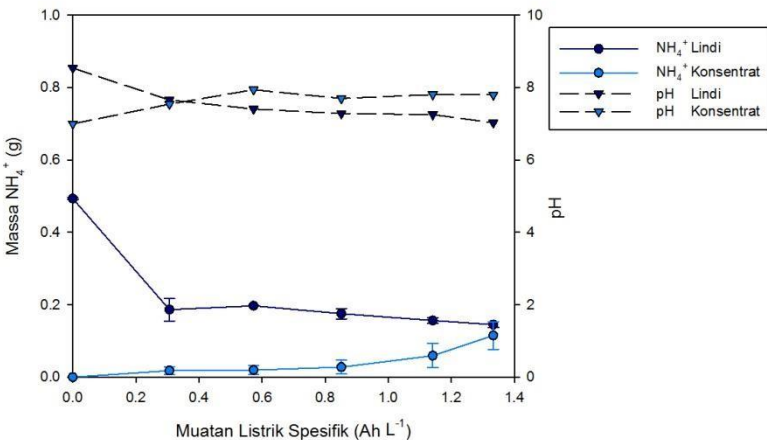
Potensi *recovery* ammonium rata-rata variasi pH lindi 5,5 adalah sebesar 0,08 gram.

Pada pengukuran pH hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari $\pm 5,50$ hingga 4,01-4,36. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adalah HOCl. Maka kemungkinan reaksi (White,1986) yang terjadi adalah:

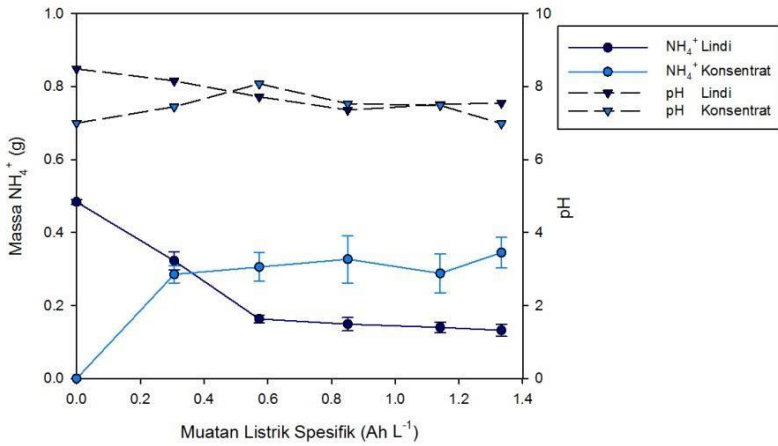


Adanya proses elektrodialisis hingga jam terakhir operasi ditandai dengan massa ammonium yang tertangkap di konsentrat pada jam terakhir. Pada variasi pH awal proses = pH asli lindi ini, massa ammonium terpindahkan ke konsentrat terbesar mencapai 0,09 gram saat penambahan 1 gram NaCl L^{-1} dan turun ke 0,07 gram saat penambahan 2 gram NaCl L^{-1} .

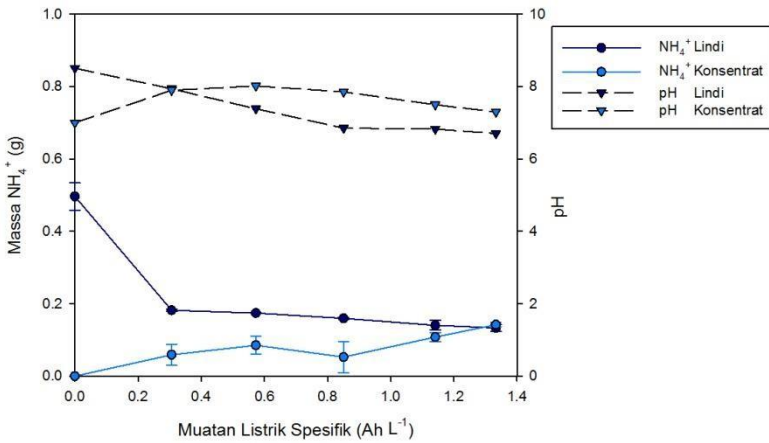
Selanjutnya dilakukan operasi reaktor pada pH awal proses = 8,5. Berikut ini pada Gambar 4.34 hingga Gambar 4.36 adalah hasil analisis ammonium seiring penambahan NaCl pada pH 8,5:



Gambar 4. 34 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 35 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

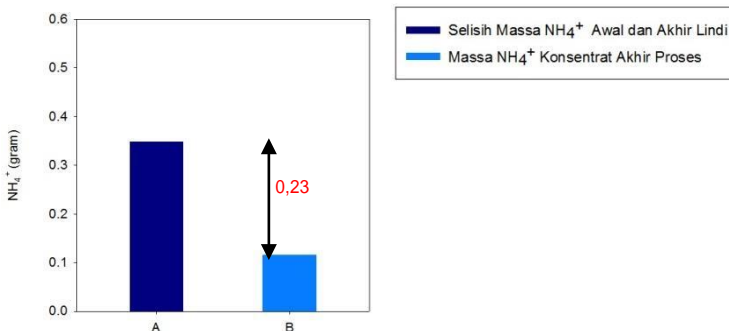


Gambar 4. 36 Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

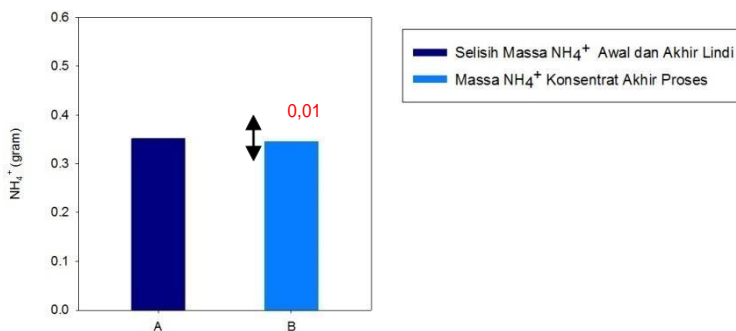
Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 8,5 menunjukkan penyisihan ammonium sebesar 70,53% (0,348 gram) hingga jam ke-12 pada muatan listrik spesifik sebesar 1,33 Ah L⁻¹ tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan 1 g NaCl L⁻¹ penyisihan ammonium pada lindi adalah sebesar 72,67% (0,352 gram) dan pada penambahan 2 g NaCl L⁻¹ mencapai 73,12% (0,363 gram).

Penyisihan NH₃ oleh klorin atau hipoklorit yang diproduksi secara elektrokimia dengan oksidasi tidak langsung (Abbas *et al.*, 2009). Dengan makin bertambahnya NaCl maka akan bertambah pula hipoklorit dalam elektrolit untuk bersenyawa dengan ammonium. Oleh sebab itu, massa ammonium yang mampu disisihkan meningkat seiring dengan bertambahnya NaCl. Pada reaktor kontrol, terjadi sedikit penurunan massa ammonium (kurang dari 0,15 gram). Hal ini menunjukkan bahwa tanpa adanya arus listrik ion NH₄⁺ sulit berpindah melalui membran kation.

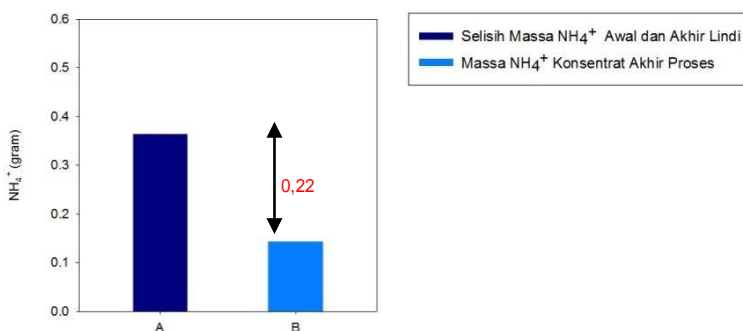
Selanjutnya dilakukan pengolahan data kesetimbangan massa untuk variasi pH awal proses 8,5 yang tertera pada Gambar 4.37 hingga 4.39 berikut:



Gambar 4. 37 Kesetimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl

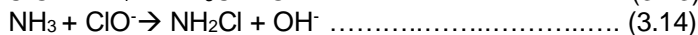


Gambar 4. 38 Kestimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L^{-1}



Gambar 4. 39 Kestimbangan Massa Penyisihan Ammonium pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L^{-1}

Potensi *recovery* ammonium rata-rata variasi pH lindi 8,5 adalah sebesar 0,20 gram. Pada pengukuran pH hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari $\pm 8,50$ hingga 6,71-7,55. Pada rentang pH ini persenyawaan klorin yang dominan adakah ClO^- . Maka kemungkinan reaksi (White, 1986) yang terjadi adalah:

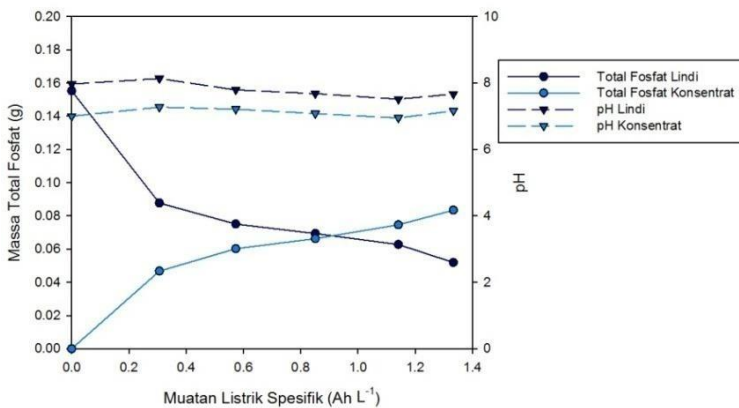


Berdasarkan kurva persenyawaan klorin dan ammonium pada pH dapat diketahui pada pH 5,5 bentuk dominan adalah NH_4^+ dan HOCl , pada pH 7,85 adalah NH_4^+ dan HOCl mulai menurun serta pada pH 8,5 mulai muncul NH_3 dan ClO^- yang mendominasi. Massa ammonium yang disisihkan dan diperbaharukan pada variasi pH asli lindi lebih tinggi dari variasi pH lainnya. Hal ini menandakan bahwa pada penyisihan ammonium paling besar terjadi pada pH asli lindi 7,85 pada reaksi dengan HOCl dan ClO^- . Dari segi perpindahan ammonium ke konsentrat tidak terjadi perubahan yang berarti seiring penambahan NaCl namun memberikan peningkatan untuk penyisihannya di lindi.

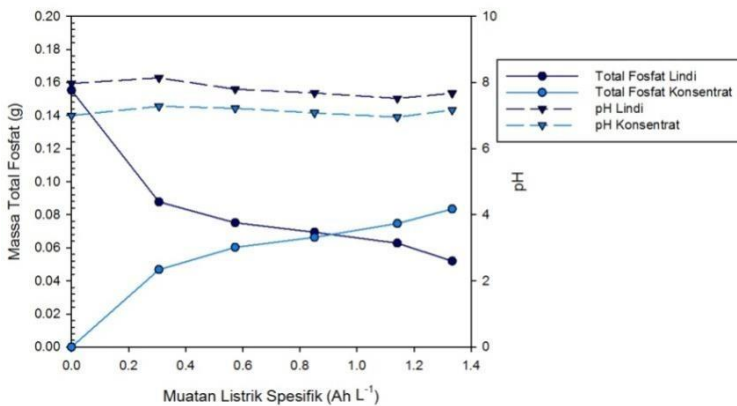
Pada pH awal 5,5 perpindahan ke konsentrat lebih kecil dari variasi pH lainnya. Hal ini menandakan untuk proses elektrodialisis lebih optimal di pH asli = 7,85 dibandingkan dengan pH 5,5. Keseimbangan massa menunjukkan bahwa penyisihan ammonium lebih besar pada massa yang hilang atau terkonversi dibandingkan perpindahannya ke konsentrat. Hal ini menunjukkan bahwa proses dominan pada penyisihan ammonium pada kombinasi proses adalah konversi oksidasi tidak langsung dengan mediator HOCl dan ClO^- .

4.2.1.3 Penyisihan Total Fosfat

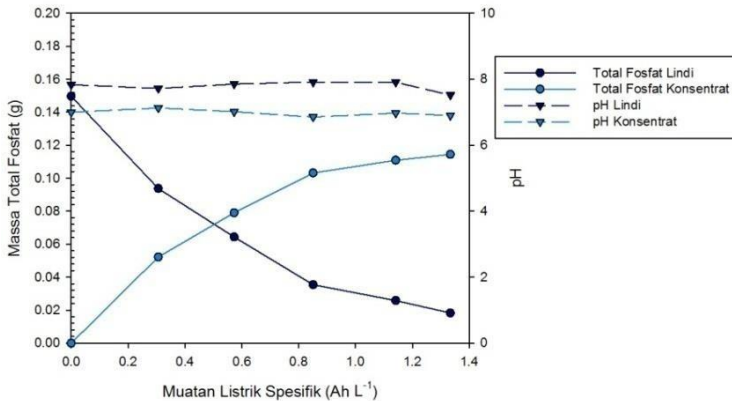
Persenyawaan ion PO_4^{3-} dapat berubah-ubah menurut pH, maka dilakukan analisis parameter total fosfat agar mampu dihitung *mass balance* dari kombinasi proses. Analisis Total Fosfat dalam bentuk P_2O_5 menggunakan metode Lorenz. Data hasil analisis total fosfat terlampir pada Lampiran B Tabel LB. 59 – LB. 67 sedangkan data hasil pengukuran pH tertera pada B Tabel LB. 14 – LB. 22..Penyisihan dan perpindahan ion PO_4^{3-} terukur dalam total fosfat dengan pH asli lindi pada Gambar 4.40 hingga 4.42 berikut:



Gambar 4. 40 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl



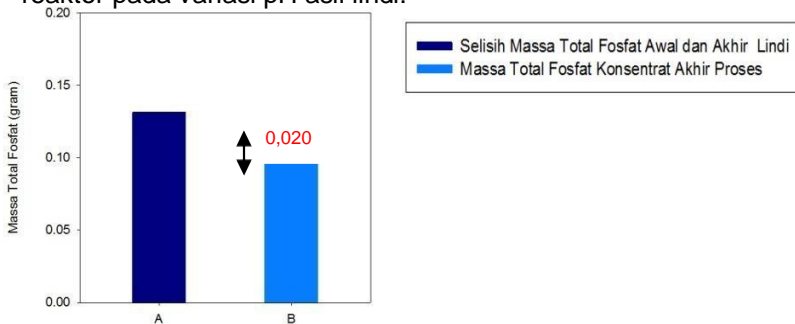
Gambar 4. 41 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



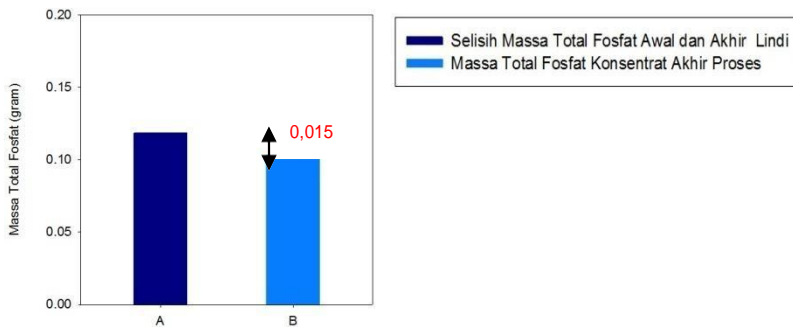
Gambar 4. 42 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada kondisi pH awal proses adalah pH awal lindi menunjukkan hingga 12 jam operasi reaktor penyisihan total fosfat sebesar 66,52% (0,10 gram) tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan 1 g NaCl L⁻¹ penyisihan total fosfat pada lindi adalah sebesar 82,15% (0,12 gram) dan pada penambahan 2 g NaCl L⁻¹ mencapai 87,75% (0,13 gram).

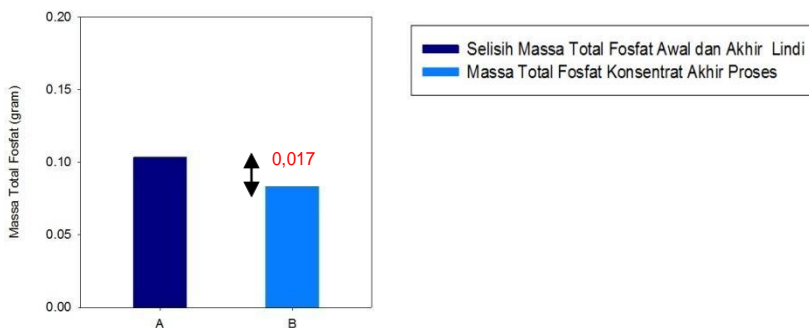
Selanjutnya dilakukan pengolahan data kesetimbangan massa total fosfat. Berikut ini pada Gambar 4.43 hingga 4.45 merupakan grafik kesetimbangan massa pada jam ke-12 operasi reaktor pada variasi pH asli lindi:



Gambar 4. 43 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 44 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

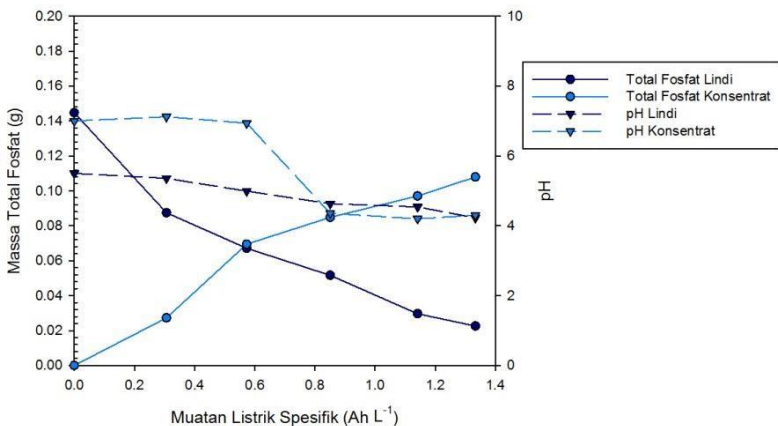


Gambar 4. 45 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Asli Lindidan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

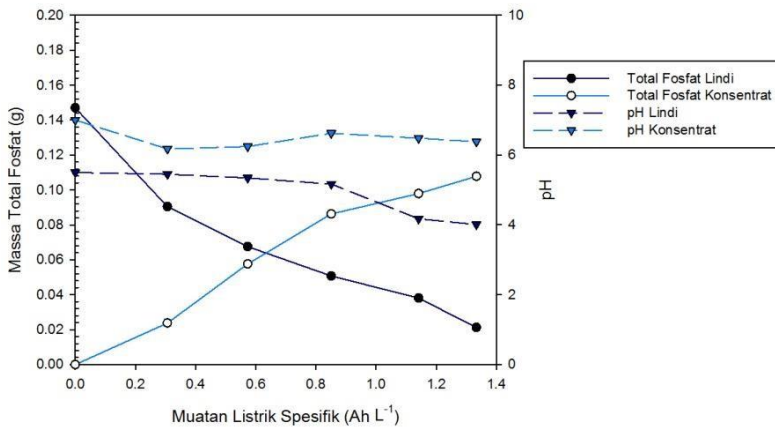
Pada reaktor kontrol terjadi sedikit penurunan total fosfat pada lindi (<0,05 gram) menunjukkan bahwa perpindahan ion fosfat sulit terjadi tanpa adanya arus listrik. Massa total fosfat yang teranalisis di konsentrat hingga jam terakhir lebih kecil dari massa total fosfat awal lindi. Hal ini menunjukkan bahwa tidak semua total fosfat lindi mampu tersisihkan hingga operasi reaktor berakhir.

Potensi *recovery* rata-rata total fosfat dari lindi pada variasi pH awal proses = pH asli lindi adalah sebesar 0,10 gram. Angka yang tertera di atas diagram batang massa ammonium konsentrat merupakan perbedaan antara selisih massa yang diukur di awal dan akhir proses pada lindi dengan massa yang mampu ditangkap konsentrat hingga akhir proses. Angka ini menunjukkan massa yang hilang dari total fosfat yang tidak tertangkap konsentrat namun tersisihkan dari lindi. Hilangnya massa ammonium dapat diakibatkan ammonium terkonversi ke persenyawaan lain sehingga tidak terukur sebagai ion PO_4^{3-} .

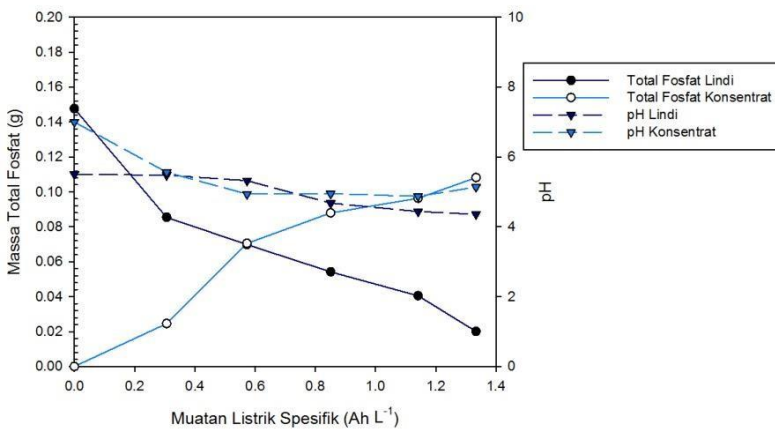
Pada pengukuran pH lindi hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari $\pm 7,85$ hingga $7,17-7,52$. Pada rentang pH ini bentuk spesies ion fosfat yang dominan adalah H_2PO_4^- (Engelke dan Strain, 1954). Perpindahan ion ke konsentrat sedikit bertambah seiring dengan penambahan NaCl berturut-turut sebesar dari 0,08; 0,10 hingga 0,13 gram). Selanjutnya pada Gambar 4.46 hingga 4.48 adalah variasi yang dilakukan untuk pH awal proses 5,5 dengan penyisihan sebagai berikut:



Gambar 4. 46 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl



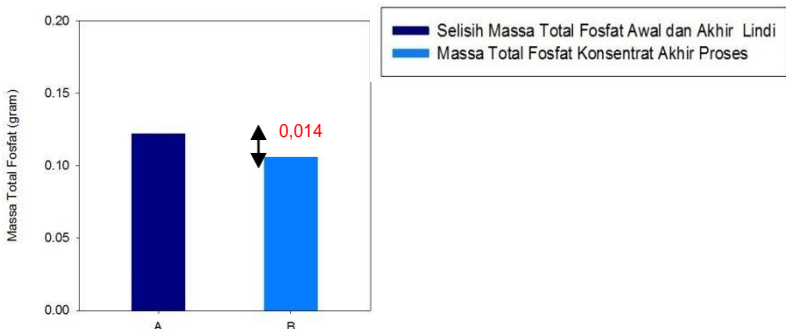
Gambar 4. 47 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



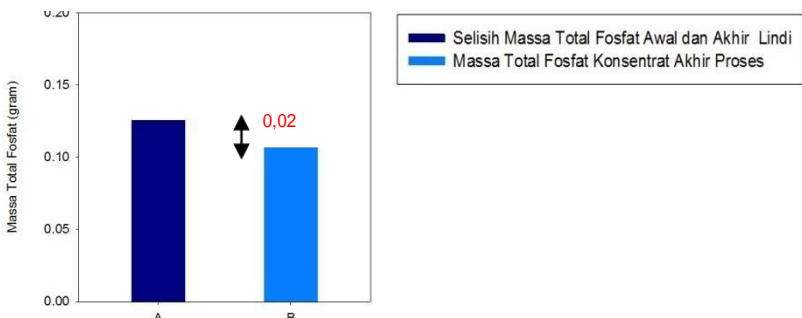
Gambar 4. 48 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 5,5 menunjukkan penyisihan total fosfat sebesar 84,37% (0,122 gram) hingga jam ke-12 tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan 1 g NaCl L⁻¹ penyisihan total fosfat pada lindi adalah sebesar 85,5% (0,126 gram) dan pada penambahan 2 g NaCl L⁻¹ mencapai 75,61% (0,112 gram). Pada reaktor kontrol terjadi sedikit penurunan total fosfat pada lindi (<0,05 gram) menunjukkan bahwa perpindahan ion fosfat sulit terjadi tanpa adanya arus listrik.

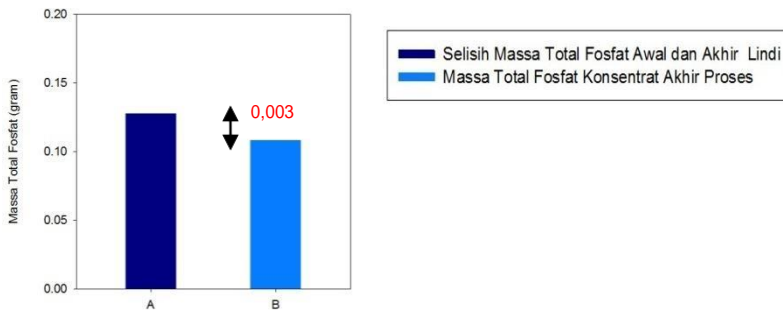
Selanjutnya pengolahan data dilakukan untuk mengetahui kesetimbangan massa variasi pH awal proses 5,5 yang tertera pada Gambar 4.49 hingga 4.51 berikut:



Gambar 4. 49 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 50 Kesetimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

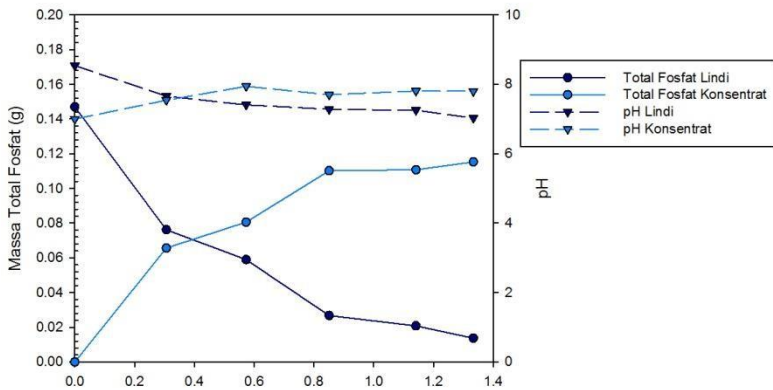


Gambar 4. 51 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

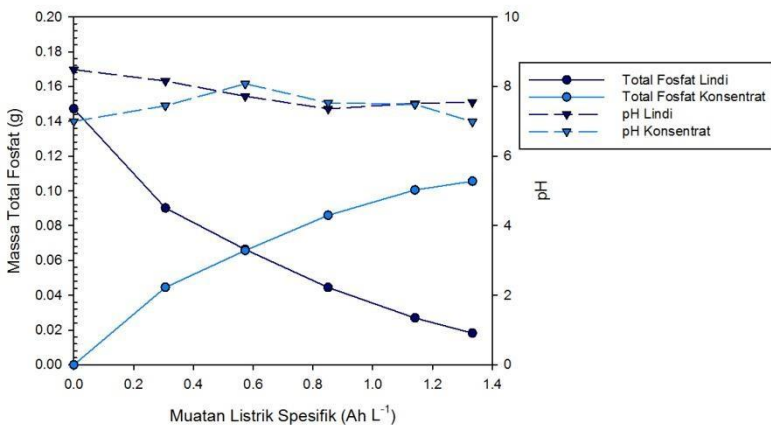
Potensi *recovery* rata-rata total fosfat dari lindi pada variasi pH awal proses = 5,5 adalah sebesar 0,11 gram. Angka yang tertera di atas diagram batang massa ammonium konsentrat merupakan perbedaan antara selisih massa yang diukur di awal dan akhir proses pada lindi dengan massa yang mampu ditangkap konsentrat hingga akhir proses. Angka ini menunjukkan massa yang hilang dari total fosfat yang tidak tertangkap konsentrat namun tersisihkan dari lindi. Hilangnya massa ammonium dapat diakibatkan ammonium terkonversi ke persenyawaan lain sehingga tidak terukur sebagai ion PO_4^{3-} .

Pada pengukuran pH lindi hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari 5,50 hingga 4,01-4,36. Pada rentang pH ini bentuk spesies ion fosfat yang dominan adalah H_2PO_4^- . Perpindahan ion ke konsentrat tidak bertambah seiring dengan penambahan NaCl.

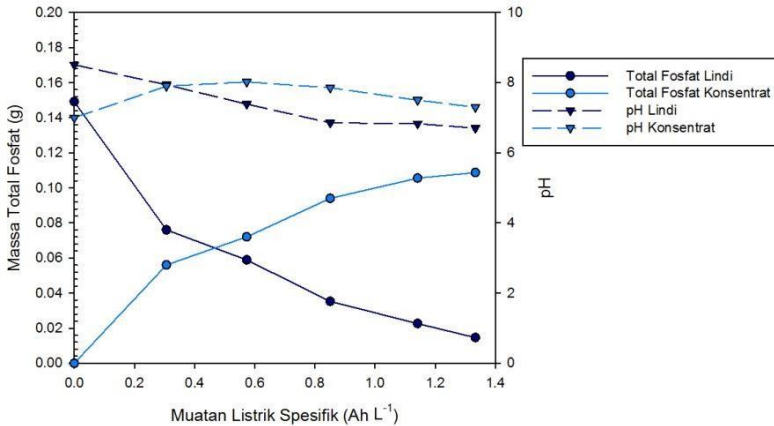
Selanjutnya dilakukan operasi reaktor pada pH awal proses = 8,5. Berikut ini pada Gambar 4.52 - Gambar 4.54 adalah hasil analisis total fosfat seiring penambahan NaCl pada pH 8,5:



Gambar 4. 52 PenyisihanTotal Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 53 PenyisihanTotal Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



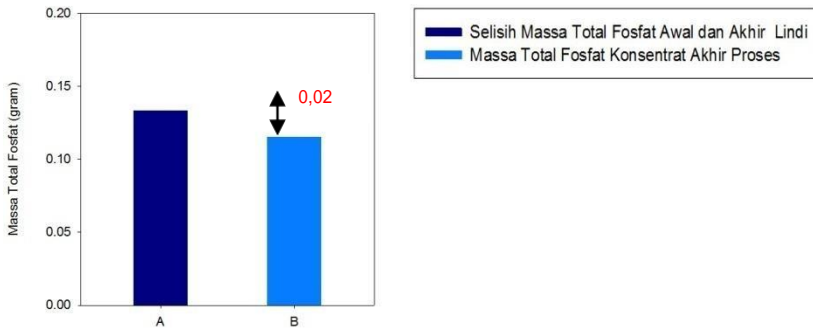
Gambar 4. 54 Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Pada kondisi pH awal proses dikondisikan 8,5 menunjukkan penyisihan total fosfat sebesar 90,66% (0,133 gram) hingga jam ke-12 tanpa penambahan NaCl. Pada penambahan 1 g NaCl L⁻¹ penyisihan total fosfat pada lindi adalah sebesar 87,62% (0,129 gram) dan pada penambahan 2 g NaCl L⁻¹ mencapai 90,16% (0,134 gram).

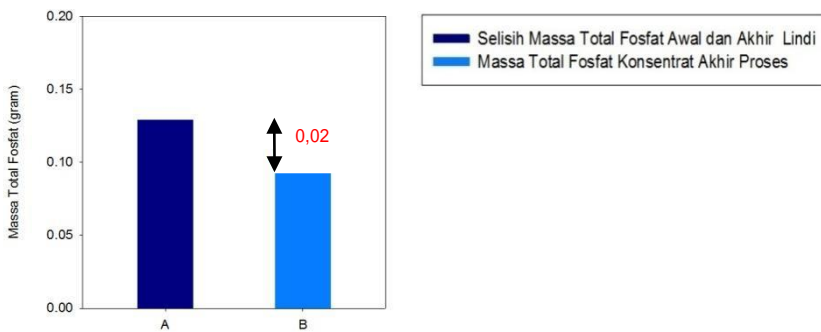
Pada reaktor kontrol terjadi sedikit penurunan total fosfat pada lindi (<0,05 gram) menunjukkan bahwa perpindahan ion fosfat sulit terjadi tanpa adanya arus listrik.

Potensi *recovery* rata-rata total fosfat dari lindi pada variasi pH awal proses 8,5 adalah sebesar 0,11 gram dihitung dari konsentrasi total fosfat pada jam terakhir yang mampu diterima konsentrat. Pada pengukuran pH lindi hingga jam terakhir operasi menunjukkan bahwa pH lindi turun dari ±8,50 hingga 6,71-7,55. Pada rentang pH ini bentuk spesies ion fosfat yang dominan adalah H₂PO₄⁻. Perpindahan ion ke konsentrat tidak bertambah seiring dengan penambahan NaCl.

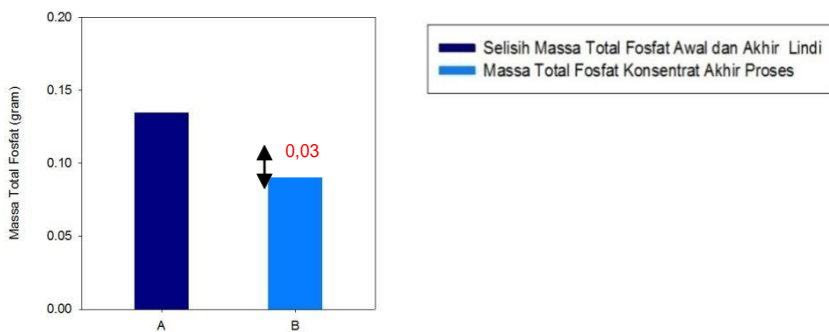
Kesetimbangan massa variasi pH awal proses 8,5 yang selanjutnya tertera pada Gambar 4.55 hingga 4.57 berikut:



Gambar 4. 55 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 56 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 57 Kestimbangan Massa Penyisihan Total Fosfat pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Penyisihan total fosfat terbesar terjadi pada variasi pH awal proses = 8,5. Semakin tinggi pH makin berkurang sifat kelarutan fosfat (Mackay *et al.*, 1996) maka dimungkinkan pada pH 8,5 mulai muncul bentuk fosfat yang tidak terlarut ditandai dengan adanya presipitat yang lebih banyak pada permukaan membran. Sedangkan untuk perpindahan ke kompartemen konsentrat tidak ada penambahan seiring dengan penambahan NaCl maupun perubahan pH. Oleh sebab itu, variasi pH dan penambahan NaCl tidak memberikan perubahan yang berarti pada perpindahan ion fosfat. Menurut persenyawaan ion fosfat berdasarkan pH (Engelke dan Strain, 1954) pada rentang pH di mana penelitian ini dilakukan (4,5-8,5) bentuk dominan spesies adalah sama yaitu sebagai H_2PO_4^- sehingga perpindahan ionnya pun tidak menunjukkan perbedaan yang berarti antar perubahan pH penelitian.

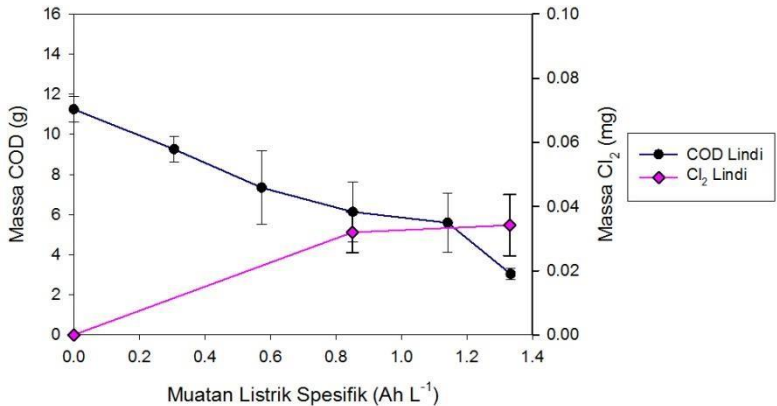
Dengan membandingkan massa antara total fosfat yang mampu berpindah ke konsentrat dengan massa yang hilang akibat terkonversi maka secara keseluruhan massa total fosfat yang berpindah ke konsentrat lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa penyisihan total fosfat pada lindi didominasi oleh proses elektrodialisis.

4.2.2 Hasil Proses Oksidasi Elektrokimia

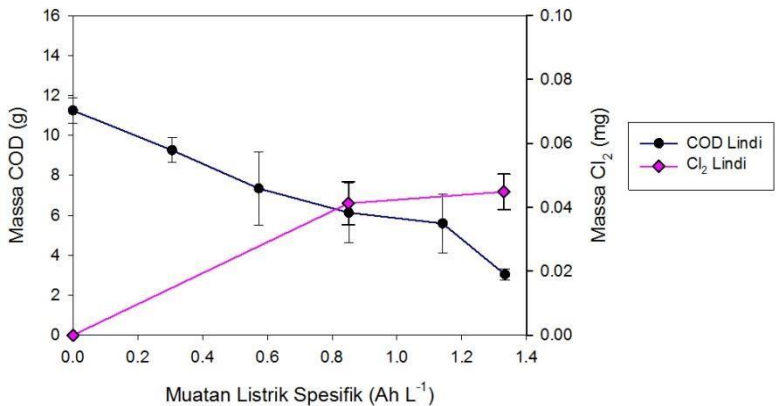
4.2.1.1 Penyisihan COD

Analisis COD bertujuan untuk menentukan kebutuhan oksigen yang dibutuhkan untuk degradasi polutan organik secara kimiawi dengan menggunakan oksidator kuat. Pada proses oksidasi elektrokimia terjadi oksidasi polutan organik secara oksidasi tidak langsung. Dalam oksidasi tidak langsung, oksidator kuat dihasilkan secara elektrokimia di permukaan anoda dan menghancurkan polutan pada elektrolit. Oksidator yang dihasilkan pada umumnya adalah klorin yang dihasilkan dari oksidasi klorida di anoda (Anglada *etal.*, 2009).

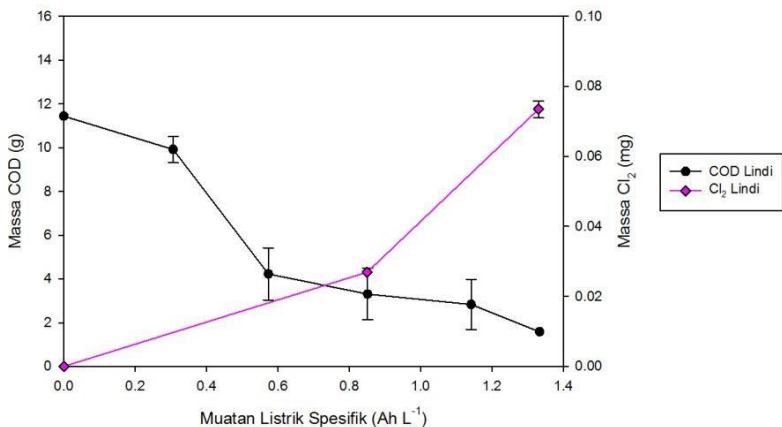
Data hasil analisis COD dan total klorin tertera pada lampiran Tabel LB. 41 – LB. 49. Penyisihan COD beserta kenaikan konsentrasi Cl_2 pada pH awal proses sama dengan pH asli lindi tertera pada Gambar 4.58 hingga 4.60 berikut ini:



Gambar 4. 58 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 59 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L^{-1}

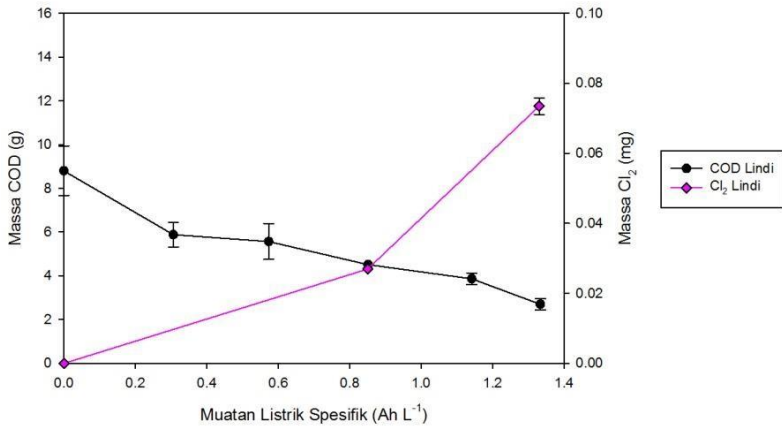


Gambar 4. 60 Penyisihan COD pada Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

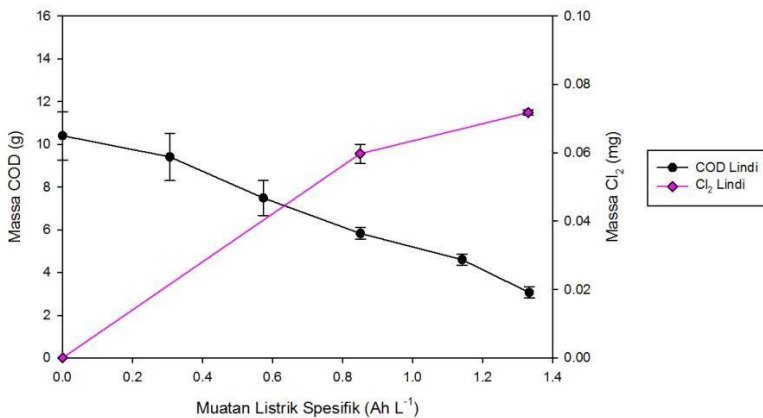
Massa Cl₂ yang terukur dan peningkatannya seiring waktu pengambilan sampel sangat kecil padahal penyisihan COD variasi pH awal sama dengan pH asli lindi hingga jam terakhir operasi berturut-turut sebesar 73,00% (8,21 gram), 83,13% (8,98 gram) dan 86,15% (9,86 gram) seiring variasi penambahan NaCl pH asli lindi.

Pada reaktor kontrol terjadi penurunan massa COD sebesar < 1 gram. Hal ini membuktikan bahwa dimungkinkan terjadi penyisihan COD melalui proses adsorpsi di anoda karbon. Menurut Wendt dan Kreysa (1999), dalam oksidasi elektrokimia proses adsorpsi terjadi sebagai reaksi perantara yang terjadi pada permukaan elektroda karena dibutuhkan reaksi yang dapat memenuhi kondisi termodinamikanya. Tidak jarang bahwa proses oksidasi elektrokimia membutuhkan proses adsorpsi sebagai elektro katalisatornya.

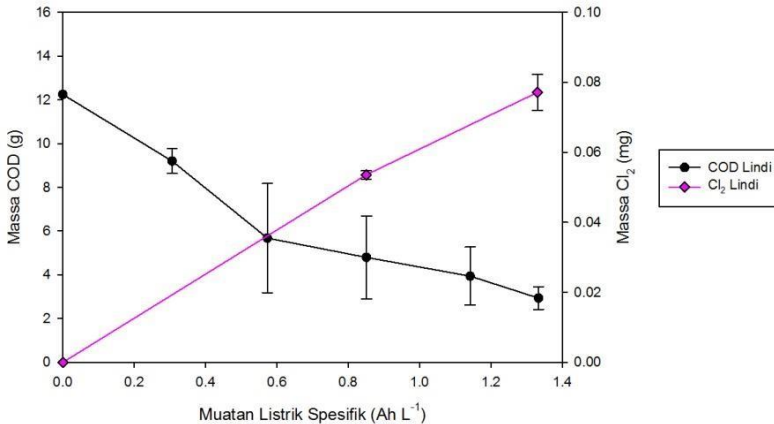
Berikut ini pada Gambar 4.61 hingga 4.63 merupakan penyisihan COD dan kenaikan Cl_2 untuk pH awal proses 5,5:



Gambar 4. 61Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl



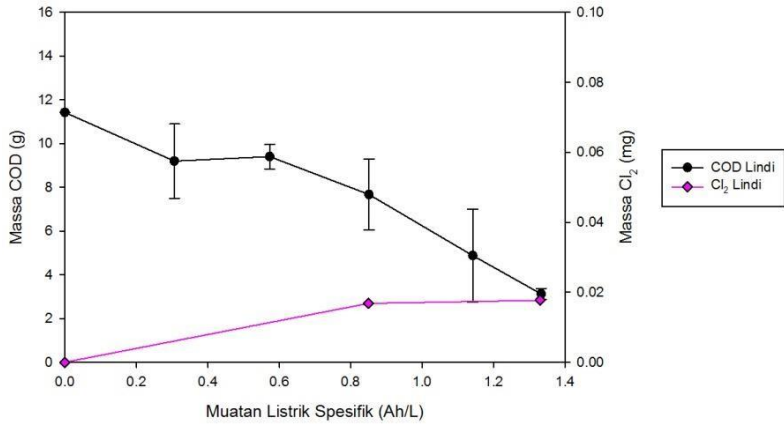
Gambar 4. 62Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



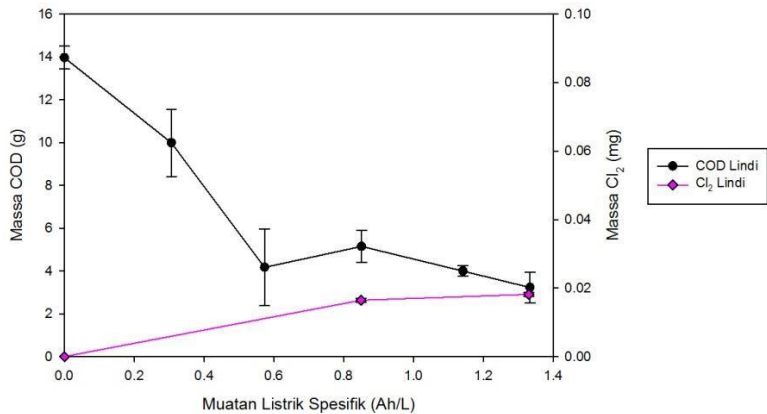
Gambar 4. 63Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Untuk pH awal proses 5,5, penyisihan COD hingga jam ke-12 berturut-turut sebesar 75,00% (8,10 gram); 70,58% (7,34 gram) dan 76,00% (9,31 gram) untuk masing-masing variasi penambahan NaCl. Sama halnya dengan kondisi pH awal proses sama dengan pH asli lindi, massa Cl₂ yang terukur pada variasi pH 5,5 dan peningkatannya seiring waktu pengambilan sampel sangat kecil. Hal ini dapat disebabkan oleh dua kemungkinan yaitu yang pertama adalah Cl₂ dapat teroksidasi kembali di katoda saat memasuki kompartemen katoda menjadi bentuk klorida Cl⁻ kembali. Selain itu, dapat dimungkinkan adanya elektrosorpsi ke dalam anoda karbon sehingga menyerap Cl₂.

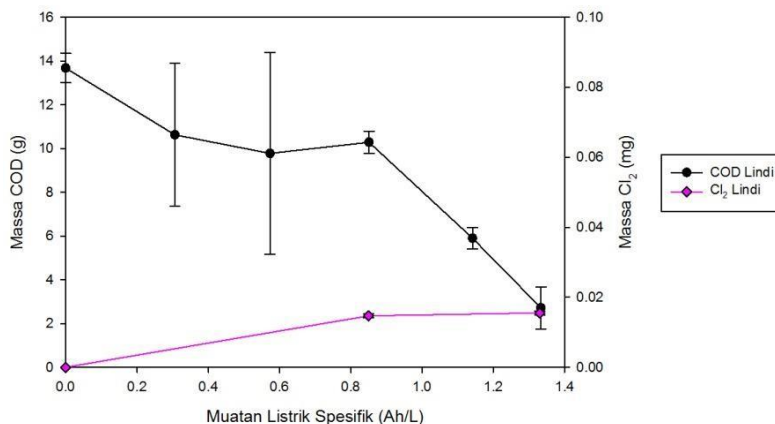
Berikut pada Gambar 4.64 hingga Gambar 4.66 merupakan penyisihan COD dan kenaikan Cl_2 untuk pH awal proses 8,5 :



Gambar 4. 64 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl



Gambar 4. 65 Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹



Gambar 4. 66Penyisihan COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

Untuk pH awal proses 8,5, penyisihan COD hingga jam ke-12 berturut-turut sebesar 72,68% (8,31 gram); 76,89% (10,74 gram) dan 80,14% (10,96 gram) untuk masing-masing variasi penambahan NaCl. Pada reaktor kontrol juga terjadi penurunan massa COD sebesar < 1 gram.

Peningkatan efisiensi penyisihan COD pada variasi pH awal proses 5,5 lebih rendah dibandingkan pada variasi pH awal = pH asli lindi dan pH awal 8,5 karena sistem dengan pH rendah sering mengakibatkan terjadinya desorpsi yang menghalangi fungsi klorin sebagai oksidator. Oleh sebab itu, nilai pH yang lebih tinggi secara teoritis mampu meningkatkan oksidasi elektrokimia dari polutan di mana HClO dan ClO⁻ tidak terpengaruh oleh desorpsi gas dan dapat bertindak sebagai oksidator (Anglada *et al.*, 2011).

Penyisihan massa COD pada pH 8,5 paling besar dibandingkan pH 7,85 maupun 5,5. Massa Cl_2 terukur pada pH 8,5 juga paling rendah sesuai dengan kurva persenyawaan klorin. Maka dimungkinkan penyisihan yang lebih besar pada 8,5 akibat konversi COD ke seyawa organoklorin dengan bantuan ClO^- .

Dari analisis parameter COD dan total klorin di reaktor penelitian utama dan mempertimbangkan penyisihan massa COD di reaktor kontrol yang tidak dialiri arus listrik maka penyisihan COD dapat terjadi akibat beberapa proses. Proses tersebut antara lain merupakan proses adsorpsi ke anoda yang tidak dialiri arus listrik, oksidasi langsung dan elektrosorpsi di anoda yang dialiri listrik dan oksidasi tidak langsung dengan mediator persenyawaan klorin sesuai pH terukur pada uji.

4.2.1.1 Peningkatan Nilai BOD/COD

Pada penelitian ini dilakukan analisis BOD/COD lindi awal sebelum proses dan dibandingkan dengan BOD/COD akhir setelah dilakukan elektrodialisis selama 12 jam pada lindi. Pada seluruh percobaan terjadi peningkatan rasio BOD/COD setelah melalui proses walaupun belum memasuki rentang pengolahan biologis.

Peningkatan rasio BOD/COD ini disebabkan oleh kemampuan kombinasi proses untuk menyisihkan polutan organik COD lindi sehingga mampu membuat lindi lebih dapat diterima oleh unit pengolahan biologis yang telah ada pada TPA. Pada Tabel 4.2 hingga 4.4 merupakan peningkatan rasio BOD/COD pada pH awal proses sama dengan pH awal lindi sedangkan Tabel 4.5 hingga 4.7 menunjukkan peningkatan rasio BOD/COD pada pH awal proses 5,5. Tabel 4.8 hingga 4.10 menunjukkan peningkatan rasio BOD/COD pada pH awal proses 8,5.

Tabel 4. 2 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 177,408 | 4320 | -86,170 | 3060 | 0,0411 |
| 1,33 | 263,578 | 1260 | | | 0,2092 |

Tabel 4. 3 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindidan
Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 98,208 | 4140 | -29,462 | 3420 | 0,0237 |
| 1,33 | 127,670 | 720 | | | 0,1773 |

Tabel 4. 4 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Asli Lindi
dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 83,477 | 4576 | -83,477 | 3872 | 0,0182 |
| 1,33 | 166,954 | 704 | | | 0,2372 |

Tabel 4. 5 Perubahan BOD CODpada Variasi pH Awal Proses 5,5 Tanpa
Penambahan NaCl

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 129,600 | 4480,00 | -28,800 | 3200 | 0,0289 |
| 1,33 | 158,400 | 1280,00 | | | 0,1238 |

Tabel 4. 6 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 5,5dan
Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 14,137 | 4480,00 | 0,000 | 3040 | 0,0032 |
| 1,33 | 14,137 | 1440,00 | | | 0,0098 |

Tabel 4. 7 Perubahan BOD CODp ada Variasi pH Awal Proses 5,5 dan
Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | ΔBOD | ΔCOD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 47,124 | 4897,96 | -28,274 | 3755,102 | 0,0096 |
| 1,33 | 75,398 | 1142,86 | | | 0,0660 |

Tabel 4. 8 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5
Tanpa Penambahan NaCl

| Energi | BOD | COD | Δ BOD | Δ COD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 65,974 | 4571,43 | -37,699 | 3265,306 | 0,0144 |
| 1,33 | 103,673 | 1306,12 | | | 0,0794 |

Tabel 4. 9 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan
Penambahan NaCl 1 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | Δ BOD | Δ COD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 108,385 | 5735,85 | -32,987 | 4075,471 | 0,0189 |
| 1,33 | 141,372 | 1660,38 | | | 0,0851 |

Tabel 4. 10 Perubahan BOD COD pada Variasi pH Awal Proses 8,5 dan
Penambahan NaCl 2 g L⁻¹

| Energi | BOD | COD | Δ BOD | Δ COD | BOD/COD |
|--------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------|
| (Ah/L) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | (mg L ⁻¹) | |
| 0,00 | 34,813 | 5283,02 | -13,055 | 3773,584 | 0,0066 |
| 1,33 | 47,868 | 1509,43 | | | 0,0317 |

Pada semua percobaan terjadi sedikit kenaikan konsentrasi BOD dan penurunan COD. Kenaikan BOD disebabkan karena masih ada senyawa organik *biodegradable* yang belum sepenuhnya mampu teroksidasi dari COD. Selain itu, kenaikan BOD menunjukkan berkurangnya oksigen terlarut pada sampel sebab dikonsumsi oleh mikroorganisme.

pH berdampak pada kelarutan dari berbagai senyawa toksik dan nutrisi maka dapat mempengaruhi kinerja mikroorganisme penerimanya dalam limbah. Semakin asam kondisi air limbah, makin banyak senyawa logam yang larut sehingga makin beracun. BOD awal dari limbah dengan pH awal 7,85 (asli limbah) lebih besar dari BOD awal limbah dengan pengondisian pH awal 8,5. Namun pada pH 5,5 BOD awal lebih rendah dari variasi pH lainnya. Akumulasi garam yang dapat terjadi akibat limbah akan mengganggu proses biologis (Ogata *et al.*, 2016). Namun,

pada hasil analisis tidak terjadi peningkatan BOD yang berarti seiring dengan penambahan NaCl. Dari keseluruhan proses, peningkatan BOD sedikit apabila dibandingkan dengan penurunan COD yaitu berkisar pada 20-86 mg BOD L⁻¹ dari kisaran COD 4.000-5.000 mg L⁻¹. Hal ini menandakan pada kombinasi proses hampir semua senyawa organik mampu dibiodegradasi atau terkonversi.

Penurunan konsentrasi COD adalah akibat terkonversinya COD menjadi senyawa yang lebih mudah dibiodegradasi sehingga BOD meningkat di akhir proses. Penurunan COD juga terjadi akibat konversinya menjadi senyawa organik terklorinasi (Rajkumar *et al.*, 2005) yang tidak terukur dalam bentuk COD.

Peningkatan rasio BOD/COD dari awal ke akhir proses menandakan bahwa proses mampu meningkatkan tingkat biodegradabilitas lindi. Peningkatan BOD/COD terbesar adalah pada saat operasi di variasi pH awal proses = pH asli lindi = 7,85 dengan penambahan 2 gram NaCl per liter yang mencapai rasio BOD/COD = 0,237 di akhir proses. Walau terjadi peningkatan BOD/COD untuk penerapan kombinasi proses sebagai pra-pengolahan sebelum memasuki unit biologis, kemungkinan bahwa konsentrasi TSS tinggi pada *feed* lindi memerlukan kombinasi dari unit pra-pengolahan lain seperti filtrasi. Penerapan kombinasi proses mampu meningkatkan BOD/COD awal yang rendah (<0,1) yaitu cocok untuk lindi berusia tua (>10 tahun).

4.3 Konsumsi Energi Spesifik Proses

Perhitungan konsumsi energi spesifik proses (W) berkaitan dengan muatan listrik spesifik (Q) dan tegangan listrik tertentu (V) (Anglada *et al.*, 2009). Perhitungan kebutuhan energi spesifik proses dilakukan pada seluruh uji dengan membandingkan massa polutan yang tersisihkan per energi spesifik proses.

Pada Tabel 4.11 berikut merupakan perhitungan konsumsi energi pada parameter TDS :

Tabel 4. 11 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter TDS

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | %R TDS | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan/ Konsumsi Energi |
|----------------------|---------------------------------|--------|-------------------|---------------------------------------|
| | (Wh/L) | | TDS (gram) | (g / Wh) |
| pH Asli Tanpa NaCl | 16,844 | 79,01 | 4,39 | 0,261 |
| pH Asli + 1 g/L NaCl | 12,778 | 64,56 | 4,55 | 0,356 |
| pH Asli + 2 g/L NaCl | 11,222 | 60,47 | 5,28 | 0,471 |
| pH 5,5 Tanpa NaCl | 14,456 | 76,73 | 4,49 | 0,311 |
| pH 5,5 + 1 g/L NaCl | 13,633 | 68,87 | 4,80 | 0,352 |
| pH 5,5 + 2 g/L NaCl | 10,344 | 64,27 | 5,93 | 0,573 |
| pH 8,5 Tanpa NaCl | 14,800 | 69,65 | 3,86 | 0,261 |
| pH 8,5 + 1 g/L NaCl | 11,478 | 54,64 | 3,54 | 0,308 |
| pH 8,5 + 2 g/L NaCl | 11,067 | 61,53 | 5,09 | 0,460 |

Dari keseluruhan uji reaktor, massa tersisihkan TDS paling besar terjadi pada operasi reaktor dengan variasi pH awal proses 5,5 dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,573 g W⁻¹h⁻¹. Pada Tabel 4.12 berikut merupakan perhitungan konsumsi energi pada parameter klorida :

Tabel 4. 12 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Klorida

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | %R Klorida | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan/ Konsumsi Energi |
|----------------------|---------------------------------|------------|-------------------|---------------------------------------|
| | (Wh/L) | | Klorida (gram) | (g / Wh) |
| pH Asli Tanpa NaCl | 16,844 | 80,77 | 4,253 | 0,252 |
| pH Asli + 1 g/L NaCl | 12,778 | 78,40 | 5,292 | 0,414 |
| pH Asli + 2 g/L NaCl | 11,222 | 79,61 | 6,868 | 0,612 |

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | %R Klorida | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan /Konsumsi Energi |
|---------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|------------------------------------|
| | (Wh/L) | | Klorida (gram) | (g / Wh) |
| pH 5,5 Tanpa NaCl | 14,456 | 79,39 | 4,602 | 0,318 |
| pH 5,5 + 1 g/L NaCl | 13,633 | 77,94 | 5,229 | 0,384 |
| pH 5,5 + 2 g/L NaCl | 10,344 | 76,86 | 6,987 | 0,675 |
| pH 8,5 Tanpa NaCl | 14,800 | 79,51 | 4,216 | 0,285 |
| pH 8,5 + 1 g/L NaCl | 11,478 | 78,67 | 5,057 | 0,441 |
| pH 8,5 + 2 g/L NaCl | 11,067 | 69,27 | 5,624 | 0,508 |

Dari keseluruhan uji reaktor, massa tersisihkan klorida paling besar terjadi pada operasi reaktor dengan variasi pH awal proses 5,5 dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,701 g W⁻¹h⁻¹. Uji pada variasi ini membutuhkan konsumsi energi spesifik proses paling kecil yaitu 10,344 Wh L⁻¹. Pada Tabel 4.13 dan Tabel 4.14 berikut merupakan perhitungan konsumsi energi pada parameter ammonium dan total fosfat:

Tabel 4. 13 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Ammonium

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | %R NH ₄ ⁺ | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan /Konsumsi Energi |
|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| | (Wh/L) | | NH ₄ ⁺ (gram) | (g / Wh) |
| pH Asli Tanpa NaCl | 16,844 | 81,85 | 0,383 | 0,023 |
| pH Asli + 1 g/L NaCl | 12,778 | 83,81 | 0,356 | 0,028 |
| pH Asli + 2 g/L NaCl | 11,222 | 84,09 | 0,466 | 0,042 |
| pH 5,5 Tanpa NaCl | 14,456 | 75,19 | 0,282 | 0,020 |
| pH 5,5 + 1 g/L NaCl | 13,633 | 72,81 | 0,339 | 0,025 |
| pH 5,5 + 2 g/L NaCl | 10,344 | 77,84 | 0,389 | 0,038 |
| pH 8,5 Tanpa NaCl | 14,800 | 70,53 | 0,348 | 0,024 |
| pH 8,5 + 1 g/L NaCl | 11,478 | 72,67 | 0,352 | 0,031 |
| pH 8,5 + 2 g/L NaCl | 11,067 | 73,12 | 0,363 | 0,033 |

Tabel 4. 14 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter Total Fosfat

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | %R Total Fosfat | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan /Konsumsi Energi |
|----------------------|---------------------------------|-----------------|---------------------|------------------------------------|
| | (Wh/L) | | Total Fosfat (gram) | (g / Wh) |
| pH Asli Tanpa NaCl | 16,844 | 66,52 | 0,103 | 0,0061 |
| pH Asli + 1 g/L NaCl | 12,778 | 82,15 | 0,118 | 0,0093 |
| pH Asli + 2 g/L NaCl | 11,222 | 87,75 | 0,131 | 0,0117 |
| pH 5,5 Tanpa NaCl | 14,456 | 84,37 | 0,122 | 0,0084 |
| pH 5,5 + 1 g/L NaCl | 13,633 | 85,52 | 0,126 | 0,0092 |
| pH 5,5 + 2 g/L NaCl | 10,344 | 75,61 | 0,112 | 0,0108 |
| pH 8,5 Tanpa NaCl | 14,800 | 90,66 | 0,133 | 0,0090 |
| pH 8,5 + 1 g/L NaCl | 11,478 | 87,62 | 0,129 | 0,0112 |
| pH 8,5 + 2 g/L NaCl | 11,067 | 90,16 | 0,134 | 0,0121 |

Dari keseluruhan uji reaktor, massa tersisihkan ammonium paling besar terjadi uji dengan Variasi pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,466 g W⁻¹h⁻¹ dengan konsumsi energi spesifik proses sebesar 11,222 Wh L⁻¹ sedangkan untuk total fosfat tercapai pada Variasi pH awal proses = 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹sebesar 0,0121 W⁻¹h⁻¹. Konsumsi energi spesifiknya sebesar 11,067 Wh L⁻¹.

Pada Tabel 4.15 berikut merupakan perhitungan konsumsi energi pada parameter COD:

Tabel 4. 15 Perhitungan Konsumsi Energi Spesifik Optimum Parameter COD

| Variasi | Konsumsi Energi Spesifik Proses | % R COD | Massa Tersisihkan | Massa Tersisihkan /Konsumsi Energi |
|----------------------|---------------------------------|--------------|-------------------|------------------------------------|
| | (Wh/L) | | COD (gram) | (g / Wh) |
| pH Asli Tanpa NaCl | 16,844 | 73,00 | 8,21 | 0,488 |
| pH Asli + 1 g/L NaCl | 12,778 | 83,13 | 8,98 | 0,703 |
| pH Asli + 2 g/L NaCl | 11,222 | 86,15 | 9,86 | 0,878 |
| pH 5,5 Tanpa NaCl | 14,456 | 75,00 | 8,10 | 0,560 |
| pH 5,5 + 1 g/L NaCl | 13,633 | 70,58 | 7,34 | 0,538 |
| pH 5,5 + 2 g/L NaCl | 10,344 | 76,00 | 9,31 | 0,900 |
| pH 8,5 Tanpa NaCl | 14,800 | 72,68 | 8,31 | 0,561 |
| pH 8,5 + 1 g/L NaCl | 11,478 | 76,89 | 10,74 | 0,935 |
| pH 8,5 + 2 g/L NaCl | 11,067 | 80,14 | 10,96 | 0,991 |

Dari keseluruhan uji reaktor, massa tersisihkan COD paling besar terjadi pada variasi pH awal proses 8,5 dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,991g Wh. Konsumsi energi spesifiknya sebesar 11,067 Wh L⁻¹. Maka, untuk penyisihan TDS dan klorida paling baik pada variasi pH Awal proses 5,5 dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,573 g W⁻¹h⁻¹sedangkan untuk klorida mencapai 0,701 g W⁻¹h⁻¹. Uji pada variasi ini membutuhkan konsumsi energi spesifik proses paling kecil yaitu 10,344 Wh L⁻¹.

Massa ammonium tersisihkan ammonium paling besar terjadi uji dengan variasi pH asli lindi dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ yaitu sebesar 0,466 g/Wh dengan konsumsi energi spesifik proses sebesar 11,222 Wh L⁻¹sedangkan untuk total fosfat tercapai pada variasi pH awal proses = 8,5 dan penambahan NaCl 2 g L⁻¹sebesar 0,0121 gW⁻¹h⁻¹. Konsumsi energi spesifiknya sebesar 11,067 Wh L⁻¹.

Secara keseluruhan pada saat penambahan NaCl 2 gram per liter mampu meningkatkan penyisihan pada semua parameter uji. Penambahan NaCl juga mampu menurunkan konsumsi energi spesifik. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan proses pada lindi dapat dengan memberikan penyisihan yang lebih baik pada lindi

bersalinitas tinggi (hingga kisaran klorida dengan konsentrasi 3600 mg L⁻¹. Maka apabila teknologi diterapkan yang secara keseluruhan mampu memberikan penyisihan semua parameter yang tinggi dan tidak perlu penambahan bahan kimia adalah variasi pH awal proses = pH asli lindi dengan penambahan NaCl 2 g L⁻¹ dengan konsumsi energi spesifik proses sebesar 11,222 Wh L⁻¹ dengan penyisihan TDS sebesar 60,47% (0,573g W⁻¹h⁻¹), penyisihan klorida sebesar 79,61% (0,612g W⁻¹h⁻¹), penyisihan ammonium sebesar 84,09% (0,042g W⁻¹h⁻¹), penyisihan total fosfat sebesar 87,75% (0,0117g W⁻¹h⁻¹) dan penyisihan COD sebesar 86,15% (0,878g W⁻¹h⁻¹).

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Penyisihan COD tertinggi diperoleh pada percobaan dengan pengondisian pH awal 8,5 dan penambahan NaCl sebesar 2 gram per liter yaitu sebesar 77,93% (10,96 gram) dengan konsumsi energi spesifik sebesar 11,067 Wh L⁻¹.
Konsumsi energi spesifik rata-rata dari keseluruhan percobaan berkisar antara 10,344 hingga 16,844 Wh L⁻¹.
2. Penyisihan NH₄⁺ meningkat seiring dengan variasi penambahan NaCl. Pada pengondisian pH awal = pH asli lindi = 7,85 dan penambahan 2 gram NaCl per liter memiliki kemampuan penyisihan ammonium yang paling tinggi yaitu sebesar 84,09% (0,466 gram) dibandingkan variasi lainnya. Potensi *recovery* ammonium rata-rata dari kombinasi proses mencapai 30% yaitu sebesar 150 mg (BOD akhir proses = 122 mg L⁻¹) dari konsentrasi ammonium awal rata-rata 500 mg (BOD awal proses 84 mg L⁻¹).

Penyisihan PO₄³⁻ dalam bentuk Total Fosfat (P₂O₅) meningkat seiring dengan variasi penambahan NaCl dan penurunan pH. Pada pengondisian pH awal = 8,5 dan penambahan 2 gram NaCl per liter memiliki kemampuan penyisihan total fosfat yang paling tinggi yaitu sebesar 90,16% (0,134 gram) dibandingkan variasi lainnya. Potensi *recovery* total fosfat rata-rata dari kombinasi proses mencapai 73,33% yaitu sebesar 110 mg dari konsentrasi total fosfat awal berkisar di 150 mg.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dalam pengolahan lindi dengan kombinasi proses elektrodialisis dan oksidasi elektrokimia adalah:

1. Pada penelitian terdapat adanya potensi terjadinya proses elektrosorpsi maka apabila penelitian ingin difokuskan pada oksidasi tidak langsung disarankan menggunakan anoda yang lebih inert.

2. Adanya presipitat yang terbentuk pada membran membutuhkan penelitian lebih lanjut untuk optimasi pemafaatannya.
3. Adanya potensi terbentuknya senyawa organik terklorinasi yang terbentuk dari proses membutuhkan analisis lebih lanjut untuk optimasi proses.
4. Pemanfaatan lebih lanjut dari ammonium dan total fosfat yang berhasil diperbaharukan pada konsentrat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, A., Jingsong, G., Ping, L., Ya, P., dan Al-Rekabi, W. 2009. "Review on Landfill Leachate Treatments". **American Journal of Applied Sciences** Vol 6 (4), hal. 672-684.
- Agustina, U.A. 2012. *Pengaruh Resirkulasi Lindi terhadap Laju Degradasi Sampah di TPANGipik Gresik*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya.
- Aljumriana. 2015. *Pengolahan Lindi Menggunakan Moving Bed Biofilm Reactor (MBBR) pada Proses Anaerobik-Anoksik*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya.
- Amokrane, A., Comel, C., dan Veron, J. 1997. "Landfill Leachates Pretreatment by Coagulation-flocculation." **Water Research** Vol. 31 (11), hal. 297-336.
- Anglada, A., Urtiaga, A., dan Ortiz, I. 2009. "Contributions of Electrochemical Oxidation to Waste-water Treatment: Fundamentals and Review of Applications". **Society of Chemical Industry** Vol. 84, hal.1747-1755.
- Anglada, A., Urtiaga, A., Ortiz, I., dan Mantzavinos, D. 2011. "Boron-doped Diamond Anodic Treatment of Landfill Leachate: Evaluation of Operating Variables and Formation of Oxidation By-products". **Water Research** Vol. 45, hal. 828-838.
- APHA, AWWA, WPCF. 2005. **Standard methods for examination of water and wastewater**, 21st.ed., APHA, AWWA, WPCF, Washington DC.
- Bashir, M., M.H., I., Kutty, S., Awang, Z., Aziz, H., Mohajeri, S., *et al*. 2009. "Landfill Leachate Treatment by Electrochemical Oxidation". **Waste Management** Vol. 29, hal. 2534-2541.
- Canizares, P., Diaz, M., Dominguez, J., dan Lobato, J. 2005. "Electrochemical Treatment of Diluted Cyanide Aqueous Water". **Journal of Chemical Technology and Biotechnology** Vol. 80, hal. 565-573.
- Chiang, L.C., Chang, J.E., dan Wen, T.C. 1995. "Indirect Oxidation Effect in Electrochemical Oxidation Treatment for Landfill Leachate". **Water Research** Vol. 29 (2), hal. 671-67.
- Choi, J.Y. dan Choi, J.H. 2010. "A Carbon Electrode Fabricated

- Using a Poly(vinylidene fluoride) Binder Controlled The Faradaic Reaction of Carbon Powder". **J. Ind. Eng. Chem.** Vol. 16(3):401–405
- Copa, W., dan Meidl, J. 1986. "Powdered Carbon Effectively Treats Toxic Leachate". **Polution Engineering** Vol.18 (7), hal. 32–34.
- Deborde, Marie dan Gunten, Urs Von. 2008. "Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment—Kinetics and mechanisms: A critical review". **Water Research** Vol. 42, hal. 13-51.
- Deng, Y., dan Englehardt, J. 2007. "Electrochemical Oxidation for Landfill Leachate Treatment" **Waste Management** Vol.27, hal. 380-388.
- Ehrig, H., dan Stegmann, R. 1992. **Biological process In Landfilling of Waste: Leachate**. Elsevier Applied Science.
- Engelke, J.L. dan Strain, H.H. 1954. "Electrical Mobility of Phosphate Ions in Paper Electrochromatography." **Journal of Analytical Chemistry** Vol. 26(12) hal. 1872-1874.
- Foo, K., dan Hameed, B. 2009. "An Overview of Landfill Leachate Treatment via Carbon Adsorption Process". **Journal of Hazardous Materials** Vol. 171 (1-3), hal. 54-60.
- Freire, D.D.C., Sant'anna, G.L., 1998. A Proposed Method Modification for The Determination of COD in Saline Waters. **Environmental Technology** Vol. 19, hal. 1243
- Hallock, R.J. and L.L. Hallock (Ed.), 1993. "Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: A Review of Literature and Recommendation for Salmonid Species" **Water Resources Investigations Report**. USA : Geological Survey.
- Huang, C., Xu, T., Zhang, Y., Xue, Y., dan Chen, G. 2007. "Application of Electrodialysis to The Production of Organic Acids: State-of-the-art and Recent Developments." **Journal of Membrane Science** Vol.288, hal.1-12.
- Jiang, C., Wang, Y., Zhang, Z., dan Xu, T. 2014. "Electrodialysis of Concentrated Brine from RO Plant to Produce Coarse

- Salt and Freshwater". **Journal of Membrane Science** Vol. 450, hal. 323-330.
- Khai, N. M., dan Trang, H. T. 2012. "Chemical Precipitation of Ammonia and Phosphate from Namson Landfill Leachate, Hanoi". **Iranica Journal of Energy & Environment** Vol.3, hal. 32-36.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M., Rooker, A., Braun, A., Ledin, A., dan Christensen, T. 2002. "Present and Long-term Composition of MSW Landfill Leachate : A Review". **Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.** Vol. 32, hal. 297-336.
- Kochany, J., dan Lipczynska-Kochany, E. 2009. "Utilization of Landfill Leachate Parameters for Pretreatment by Fenton Reaction". **Journal of Hazardous Materials** Vol. 166, hal. 248–254.
- Koshy, L., Jones T., Berube, K. 2008. "Bioreactivity of Municipal Solid Waste Landfill Leachates-Hormesis and DNA Damage," **Water Research** Vol. 42, no. 8-9, hal. 2177–2183
- Kulikowska, D., dan Klimiuk, E. 2008. "The Effect of Landfill Age on Municipal Leachate Composition". **Bioresource Technology** Vol. 99, hal. 5981–5985.
- Kurniawan, T., Lo, W.H., dan Chan, G. 2006. "Radicals-catalyzed Oxidation Reactions for Degradation of Recalcitrant Compounds from Landfill Leachate". **Chemical Engineering Journal** Vol.125, hal. 35–57.
- Li, R., Wang, J.J., Zhou, B., Awasthi, M.K., Ali, A., Zhang, Z., Lahori, A.H., Mahar, A. 2016. "Recovery of Phosphate from Aqueous Solution by Magnesium Oxide Decorated Magnetic Biochar and Its Potential as Phosphate-based Fertilizer Substitute". **Bioresource Technology**.
- Li, X., dan Zao, Q. 2002. "Map Precipitation from Landfill Leachate amd Seawater Bittern Waste". **Environmental Technology** Vol. 23 (9), hal. 989-1000.
- Li, X., Zhu, W., Wub, Y., Wang, C., Zheng, J., Xu, K., *et al.* 2015. "Recovery of Potassium from Landfill Leachate Concentrates Using a Combination of Cation-Exchange Membrane Electrolysis and Magnesium". **Separation and Purification Technology** Vol.144 , hal. 1–7.

- Lopez, A., Pagano, M., Volpe, A., dan Di Pinto, A. 2004. "Fenton's Pretreatment of Mature Landfill Leachate". **Chemosphere** Vol. 54 (7), hal.1000–1005.
- Mackay, M.W., Fitzgerald, K.A., Jackson, M.D. 1996. "The Solubility of Calcium and Phosphate in Two Specialty Amino Acid Solutions". **Journal of Parenteral and Enteral Nutrition** Vol . 20(1) hal. 63-66.
- Martinez-Huitle, C. dan Ferro, S. 2006. "Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes". **Chem. Soc. Rev.** Vol. 35, hal. 1324–1340
- Membranes International Inc. CMI-7000 Cation Exchange Membrane Technical Specification and AMI-7001 Anion Exchange Membrane Technical Specification. USA.
- Moraes, P., dan Bertazzoli, R. 2005. "Electrodegradation of Landfill Leachate in a Flow Electrochemical Reactor". **Chemosphere** Vol.58, hal. 41-46.
- Ogata, Y., Ishigaki, T., Nakagawa, M., dan M., Y. 2016. "Effect of Increasing Salinity on Biogas Production in Waste Landfills with Leachate Recirculation: A Lab-scale Model Study". **Biotechnology Reports** Vol. 10, hal. 111–116.
- Padaki, M., R., S. M., Abdullaha, M., Misdana, N., A., M., dan Kassima, M. 2015. "Membrane technology enhancement in oil–water separation : A review". **Desalination** Vol.357, hal. 197–207.
- Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor P.59/MENLHK/SETJEN/KUM.1/7/2016 tentang Baku Mutu Lindi bagi Usaha dan/atau Kegiatan Tempat Pemrosesan Akhir Sampah
- Perez, G., Saiz, J., Ibanez, R., Urtiaga, A., dan Ortiz, I. 2012. "Assessment of the Formation of Inorganic Oxidation By-products During the Electrocatalytic Treatment of Ammonium from Landfill Leachates". **Water Research** Vol.46, hal. 2579 - 2590.
- Putri, U.H. 2014. *Pengaruh Resirkulasi Lindi Bersalinitas dan Penambahan Bioaktivator EM4 Terhadap Laju Degradasi Sampah dan Pembentukan Gas di TPA Ngipik Gresik*. Tugas Akhir. Jurusan Teknik Lingkungan ITS Surabaya.

- Qiang, Z., Adams, C., 2004. "Determination of Monochloramine Formation Rate Constants with Stopped-flow Spectrometry". **Environ. Sci. Technol.** Vol. 38, hal. 1435–1444.
- Rajkumar, D., Kim, J.G. dan Palanivelu, K. 2005. "Indirect Oxidation of Phenol in The Presence of Chloride for Wastewater Treatment". **Journal of Chemical Engineering Technology** Vol. 28(1), hal. 98-105.
- Rao, N., Somasekhar, K., Kaul, S., dan Szpyrkowicz, L. 2001. "Electrochemical Oxidation of Tannery Wastewater". **Journal of Chemical Technology and Biotechnology** Vol. 76, hal. 1124-1131.
- Renou, S., Givaudan, J., Poulain, S., Dirassouyan, F., dan Moulin, P. 2008. "Landfill Leachate Treatment : Review and Opportunity". **Journal of Hazardous Materials** Vol.150, hal. 468-493.
- Riyanto. 2013. **Elektrokimia dan Aplikasinya**. Yogyakarta : Graha Ilmu.
- Schoeman, J.J., Thompson, M.A. 1996. **Electrodialysis : Water Treatment Membrane Processes**. USA : McGraw-Hill.
- Sires, I., Brillas, E., Cerisola, G., dan Panizza, M. 2008. "Comparative Depolution of Mecoprop Aqueous Solution by Electrochemical Incineration Using BDD and PbO₂ as High Oxidation Power Anodes". **Journal Electroanal Chemistry** Vol. 613, hal. 151-159.
- Tanaka, Y. 2007. **Ion Exchange Membranes: Fundamentals & Applications**. Membrane Science and Technology (12)
- Tchobanoglous, G., H. Thiesen, and S. Vigil. 1993. **Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues**. New York: McGraw-Hill Inc.
- Tatsi, A.A.; Zouboulis, A.I.; Matis, K.A.; Samaras, P. 2003. "Coagulation–flocculation Pretreatment of Sanitary Landfill Leachates". **Chemosphere** Vol. 53, hal. 737-744.
- Umar, M., Aziz, H., dan Yusoff, M. 2010. "Variability of Parameters Involved in Leachate Pollution Index and Determination of LPI from Four Landfills in Malaysia". **International Journal of Chem. Engineering** hal. 1-6.

- Ushikoshi, K., Kobayashi, T., Uematsu, K., Toji, A. K., dan Matsumoto, K. 2002. "Leachate Treatment by The Reverse Osmosis System". **Desalination** Vol. 150 (2), hal. 121–129.
- Valero, F., Barcelo, A., dan Arbs, R. 2011. **Electrodialysis Technology Theory and Applications Desalination Trends and Technology**. Croatia :In Tech.
- Vlyssides, A., Karlis, P., Loizidou, M., Zorpas, A., dan Arapoglolu, D. 2001. "Treatment of Leachate from a Domestic Solid Waste by an Electrolysis System". **Environmental Technology** Vol. 22 (12)hal. 1467-1476.
- Vyrides, I. dan Stuckey, D. 2009. "A Modified Method for The Determination of Chemical Oxygen Demand (COD) for Samples with High Salinity and Low Organics." **Bioresource Technology** Vol. 100(2), hal. 979-982.
- Wang, X., Zhang, X., Wang, Y., Du, Y., dan Feng, H. 2015. "Simultaneous Recovery of Ammonium and Phosphorus Via the Integration of Electrodialysis with Struvite Reactor". **Membrane Science** Vol.490hal. 65-71.
- Weber-Scanell, P.K. dan Duffy, L.K. 2007. "Effects of Total Dissolved Solids on Aquatic Organisms: " **American Journal of Environmental Sciences** Vol. 3 (1), hal. 1-6,
- Wendt, H. dan Kreysa, G. 1999. **Electrochemical Engineering : Science and Technology in Chemical and Other Industries**. TU Darmstadt : Springer.
- White G. C. 1986 **The Handbook of Chlorination**, 2nd edn, hal. 172. New York USA : Van Nostrand Reinhold.
- Yashadi, A.C., 2015. *Pengaruh Tegangan Listrik dan Penambahan Konsentrasi NaCl terhadap Proses Elektrolisis Lindi*. Tugas Akhir. Jurusan TL ITS Surabaya.
- Zhang, T., Ding, L., dan Ren, H. 2009. "Pretreatment of Ammonium Removal from Landfill Leachate by Chemical Precipitation". **Journal of Hazardous Materials** Vol.166, hal. 911–915.

LAMPIRAN A PROSEDUR ANALISIS LABORATORIUM

A.1 Pengukuran pH

Prinsip Kerja :

Potensiometri yaitu cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur analisis :

1. Mengambil sampel yang akan diukur pHnya.
2. Membilas batang silinder pH meter dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya dengan *tissue*.
3. Menyalakan pH meter lalu mencelupkan silinder pH meter ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan pH secara digital.

A.2 Pengukuran TDS

Prinsip Kerja :

Potensiometri yaitu cara analisis berdasarkan pengukuran beda potensial.

Prosedur analisis :

1. Mengambil sampel yang akan diukur pHnya.
2. Membilas batang silinder pH ion lab dengan larutan *aquadest* dan mengeringkannya dengan *tissue*.
3. Menyalakan pH ion lab, mengaturnya pada mode pengukuran TDS lalu mencelupkan silinder pH ion lab ke dalam sampel.
4. Menunggu angka pembacaan pH secara digital.

A.3 Analisis Cl^-

Prinsip Kerja :

Metode Argentometri Mohr yaitu analisis klorida dengan menitrasi larutan garam alkali.

Reagen yang dibutuhkan :

1. Larutan Perak Nitrat (AgNO_3) 1/35,45 N
Melarutkan 4,7945 g AgNO_3 dalam labu pengencer berisi 1 L larutan *aquadest*.
 2. Larutan Kalium Dikromat
Melarutkan 10 g $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ dalam labu pengencer 100 mL larutan *aquadest*.
 3. Standarisasi untuk faktor koreksi AgNO_3
 - Melarutkan 1,6485 g NaCl dengan larutan *aquadest* dalam labu ukur sampai tanda batas.
 - Mengambil 10 mL larutan NaCl dengan pipet volumetrik ke dalam *beaker glass*.
 - Menambah 3 tetes HNO_3 pekat, 3 tetes $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_4$ 10% dan 1 sendok spatula MgO atau ZnO
 - Menitrasinya dengan larutan AgNO_3 1/35,45 N hingga warna kuning berubah menjadi merah bata.
 - Menghitung nilai faktor koreksi AgNO_3 dengan persamaan berikut :
- Faktor koreksi = $10 / \text{mL titrasi } \text{AgNO}_3$

Nilai faktor tersebut sebagai nilai koreksi untuk menghitung Cl^- (mg/L) pada akhir prosedur analisis klorida.

Prosedur Analisis

1. Mengambil sampel sebanyak 12,5 mL ke dalam labu erlenmeyer berukuran 100 mL.
2. Menambahkan 0,5 mL $K_2Cr_2O_4$.
3. Menambahkan 1 sendok spatula bubuk ZnO .
4. Menitrasi dengan $AgNO_3$ hingga berubah warna menjadi merah bata.
5. Menghitung nilai dengan persamaan berikut:

$$Cl^- \text{ (mg/L)} = \frac{A \cdot f \cdot 35450}{v \cdot 35,35}$$

Keterangan :

A = Volume Titrasi Sampel (mL)

F = Faktor Koreksi $AgNO_3$

V = Volume sampel

35450 = Massa atom relatif Cl^- x 1.000 mL/L

35,45 = Massa atom relatif Cl^-

A.4 Analisis Amonium

Prinsip Kerja :

Metode Nessler

Prosedur analisis :

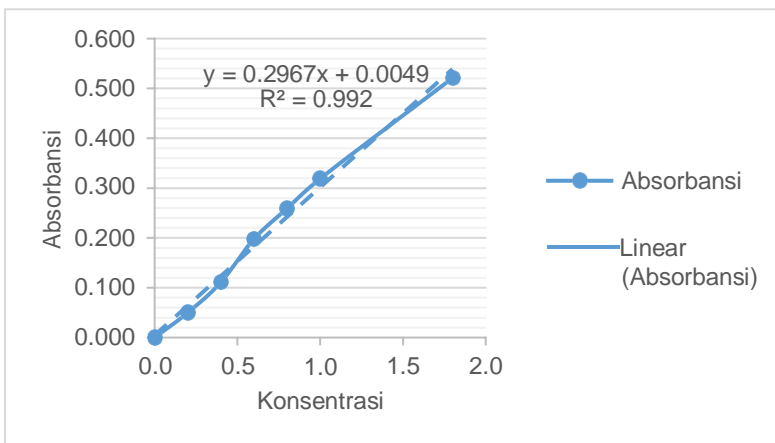
1. Menuangkan 12,5 mL sampel masing- masing pada Erlenmeyer 100 mL.
2. Menambahkan 0,5 mL larutan Nessler.
3. Menambahkan 0,6 mL larutan garam signet.
4. Diaduk dan didiamkan selama 10 menit.
5. Menganalisis menggunakan spektrofotometer dengan panjang gelombang 386 nm.
6. Mengonversi hasil bacaan pada spektrofotometer dengan kurva kalibrasi.

Tabel LA.1 Pencarian Panjang Gelombang Maksimum Analisis Ammonium

| Panjang Gelombang | Absorbansi |
|--------------------------|-------------------|
| 385 | 0,208 |
| 386 | 0,224 |
| 387 | 0,222 |
| 388 | 0,217 |
| 389 | 0,215 |
| 390 | 0,213 |
| 395 | 0,197 |
| 400 | 0,186 |
| 405 | 0,169 |

Tabel LA.2Data Kalibrasi Analisis Ammonium 1

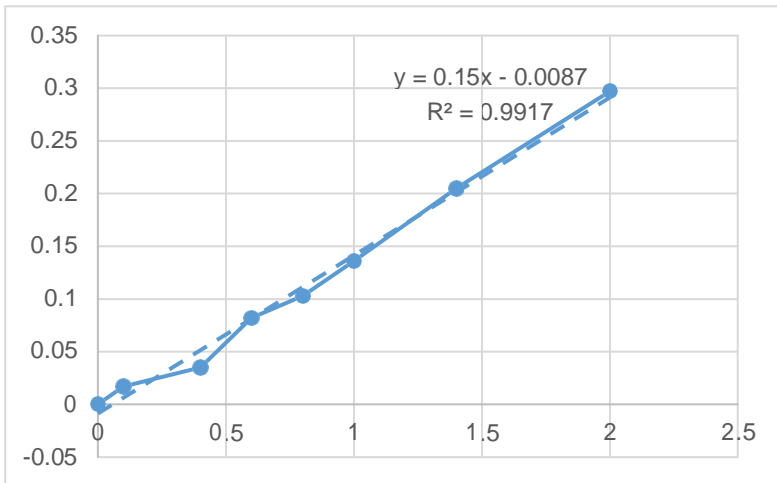
| Konsentrasi | Absorbansi |
|--------------------|-------------------|
| 0,0 | 0,000 |
| 0,2 | 0,050 |
| 0,4 | 0,111 |
| 0,6 | 0,198 |
| 0,8 | 0,259 |
| 1,0 | 0,319 |
| 1,8 | 0,521 |



Gambar LA.1 Kurva Kalibrasi Analisis Ammonium
Untuk uji variasi pH =8,5 dan 2 gram NaCl per liter
menggunakan kalibrasi sebagai berikut:

Tabel LA.3 Data Kalibrasi Analisis Ammonium 2

| Konsentrasi | Absorbansi |
|-------------|------------|
| 0 | 0 |
| 0,1 | 0,017 |
| 0,4 | 0,035 |
| 0,6 | 0,082 |
| 0,8 | 0,103 |
| 1 | 0,136 |
| 1,4 | 0,205 |
| 2 | 0,297 |



Gambar LA.2 Kurva Kalibrasi Analisis Ammonium 2

7. Setelah didapatkan persamaan linier dan regresinya, untuk pembacaan konsentrasi ammonium pada sampel didapat berdasar nilai absorbansi yang dimasukkan dalam persamaan kurva kalibrasi.

Pada persamaan linier $y = ax + b$, ditemukan bahwa nilai absorbansi = y , dan nilai konsentrasi ammonium adalah x .

A.5 Analisis Total Fosfat (P_2O_5)

Prinsip Kerja :

Metode spektrofotometri dengan Lorenz

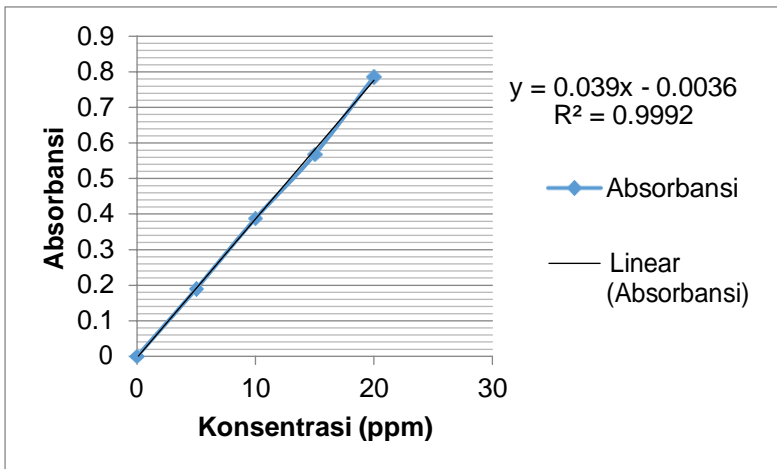
Prosedur analisis :

1. Diambil 5 mL sampel ke dalam labu erlenmeyer 500 mL.
2. Ditambahkan berturut-turut 150 mL aquadest, 40 mL HNO_3 1,2 N dan 10 mL HCl 25%
3. Dipanaskan selama setengah jam
4. Dimasukkan ke dalam labu ukur 500 mL dan ditambah aquadest sampai tanda batas kemudian dikocok.
5. Larutan disaring dengan corong penyaring.
6. Diambil 10 mL larutan dari hasil penyaringan ke dalam labu ukur 500 mL.

7. Ditambahkan 40 mL HNO₃ 1,2 N
8. Dipanaskan sampai mendidih ($\pm 70^{\circ}\text{C}$)
9. Ditambahkan 50 mL pereaksi Lorenz yang telah terlebih dahulu disaring
10. Digoyangkan selama 10 detik
11. Dibaca dengan spektrofotometer.

Tabel LA.4 Data Kalibrasi Analisis Total Fosfat

| Konsentrasi | Absorbansi |
|-------------|------------|
| 0 | 0 |
| 5 | 0,1901 |
| 10 | 0,3881 |
| 15 | 0,5676 |
| 20 | 0,7862 |



Gambar LA.3 Kurva Kalibrasi Analisis Total Fosfat

A.6 Analisis Fosfat (PO_4^{3-})

Prinsip Kerja :

Metode Klorid Timah

Prosedur analisis :

1. Mengambil 2 buah Erlenmeyer 100 mL, masing-masing diisi dengan sampel sebanyak 12,5 ml dan *aquadest* sebagai blanko 25 ml.
2. Menambahkan larutan ammonium molibdate 0,5 ml.
3. Menambahkan satu tetes larutan klorid timah.
4. Mengaduk dan didiamkan selama 7 menit.
5. Membaca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 696 nm.
6. Mengonversi nilai absorbansi dengan kurva kalibrasi.
7. Setelah didapatkan persamaan linier dan regresinya, untuk pembacaan konsentrasi total klorin pada sampel didapat berdasar nilai absorbansi yang dimasukkan dalam persamaan kurva kalibrasi.

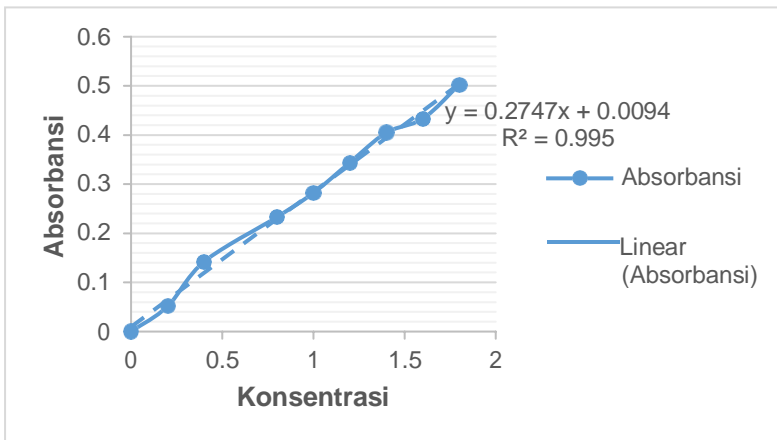
Pada persamaan linier $y = ax + b$, ditemukan bahwa nilai absorbansi = y , dan nilai konsentrasi fosfat adalah x .

Tabel LA.5 Pencarian Panjang Gelombang Maksimum Analisis Fosfat

| Panjang Gelombang | Absorbansi |
|-------------------|------------|
| 685 | 0,296 |
| 690 | 0,297 |
| 695 | 0,297 |
| 696 | 0,298 |
| 697 | 0,297 |
| 698 | 0,297 |
| 699 | 0,296 |
| 700 | 0,296 |

Tabel LA.6 Data Kalibrasi Analisis Fosfat

| Konsentrasi | Absorbansi |
|-------------|------------|
| 0 | 0 |
| 0,2 | 0,051 |
| 0,4 | 0,142 |
| 0,8 | 0,233 |
| 1 | 0,282 |
| 1,2 | 0,344 |
| 1,4 | 0,405 |
| 1,6 | 0,433 |
| 1,8 | 0,502 |



Gambar LA.4 Kurva Kalibrasi Analisis Fosfat

A.7 Analisis Total Klorin

Prinsip Kerja :

Spektrofotometri dengan pembubuhan serbuk DPD.

Prosedur analisis :

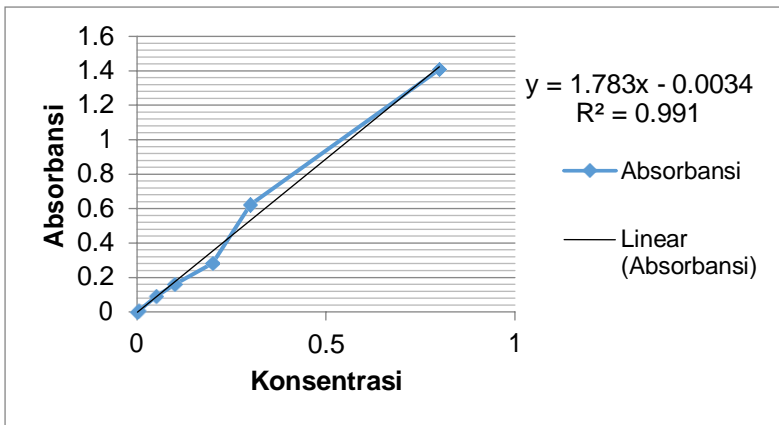
1. Menuangkan masing-masing 5 mL sampel ke dalam dua tabung COD sebagai blanko dan sampel.
2. Menambahkan serbuk DPD ke dalam tabung kuvet yang berisi 5 mL sampel .
3. Membaca pada spektrofotometer dengan panjang gelombang 510 nm dengan blanko adalah sampel 5 mL yang tidak diberi DPD.
4. Memasukkan panjang gelombang yang didapat ke dalam persamaan kurva kalibrasi.

Tabel LA.7 Pencarian Panjang Gelombang Maksimum Analisis Total Klorin

| Panjang Gelombang | Absorbansi |
|--------------------------|-------------------|
| 505 | 1,322 |
| 509 | 1,320 |
| 510 | 1,376 |
| 511 | 1,370 |
| 512 | 1,355 |
| 513 | 1,316 |

Tabel LA.8 Data Kalibrasi Analisis Total Klorin

| Konsentrasi | Absorbansi |
|-------------|------------|
| 0,001 | 0,001 |
| 0,005 | 0,008 |
| 0,05 | 0,09 |
| 0,1 | 0,16 |
| 0,2 | 0,282 |
| 0,3 | 0,623 |
| 0,8 | 1,408 |



Gambar LA.5 Kurva Kalibrasi Analisis Total Klorin

5. Setelah didapatkan persamaan linier dan regresinya, untuk pembacaan konsentrasi total klorin pada sampel didapat berdasar nilai absorbansi yang dimasukkan dalam persamaan kurva kalibrasi.

Pada persamaan linier $y = ax + b$, ditemukan bahwa nilai absorbansi = y , dan nilai konsentrasi total klorin adalah x .

A.8 Analisa COD (*Chemical Oxygen Demand*)

Prinsip Kerja :

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah jumlah oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi zat-zat organik yang ada dalam 1 liter sampel air, dimana pengoksidasi

Kalium Bikromat digunakan sebagai sumber oksigen.

Alat :

- Erlenmeyer 250 mL 2 buah
- Tabung COD
- Rak COD
- Pipet 5 mL dan 10 mL
- Pipet tetes 1 buah
- *Beaker glass* 50 mL 1 buah
- Gelas ukur 25 mL 1 buah
- Kompor listrik

Bahan :

- Larutan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,1 N
- Kristal perak sulfat (Ag_2SO_4) dicampur dengan asam sulfat (H_2SO_4)
- Kristal merkuri sulfat (Hg_2SO_4)
- Larutan standart Fero Amonium Sulfat (FAS) 0,05 N
- Larutan indikator Fenantrolin Fero Sulfat (Feroin)

Prosedur Analisis :

- Memasukkan sampel ke dalam tabung 2 COD masing-masing sebanyak 1 mL, dimana 1 tabung sebagai blanko.
- Memasukkan Hg_2SO_4 sebanyak $\frac{1}{4}$ spatula.
- Menambahkan 2 mL Larutan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 0,1 N
- Menambahkan larutan campuran asam sebanyak 4 mL.
- Menyalakan kompor listrik dan meletakkan tabung COD pada rak COD, kemudian meletakkan rak COD tersebut di atas kompor listrik. Memanaskan selama 2 jam.

- Setelah 2 jam, kompor listrik dimatikan dan tabung COD dibiarkan hingga dingin.
- Menambahkan indikator ferroin sebanyak 1 tetes.
- Memindahkan sampel yang berada pada tabung COD ke dalam erlenmeyer 100 mL kemudian melakukan titrasi menggunakan standart FAS 0,05 N hingga warna biru-hijau berubah menjadi merah-coklat permanen.
- Hitung COD sampel dengan rumus :

$$\text{COD (mg } \frac{\text{O}_2}{\text{L}}) = \frac{(A - B) \times n \times 8000}{\text{Volume sampel}} \times P \times f$$

Keterangan :

A = mL FAS titrasi blanko

B = mL FAS titrasi sampel

N = normalitas larutan FAS

P = pengenceran

F = faktor FAS

A.9Analisa BOD (*Biological Oxygen Demand*)

Prinsip Kerja :

Prosedur BOD dengan winkler

Prosedur analisis :

A. Pembuatan Air Pengencer

Air pengencer ini tergantung banyaknya sampel yang akan dianalisis dan

pengencerannya, prosedurnya:

1. Menambahkan 1 mL larutan Buffer Fosfat per liter air.
2. Menambahkan 1 mL larutan Magnesium Sulfat per liter air.
3. Menambahkan 1 mL larutan Kalium Klorida per liter air.
4. Menambahkan 1 mL larutan Feri Klorida per liter air.
5. Menambahkan 10 mg bubuk inhibitor.
6. Melakukan aerasi minimal selama 2 jam.
7. Menambahkan 1 mL larutan benih per liter air.

B. Prosedur BOD

1. Menentukan Pengenceran

Untuk menganalisis BOD harus diketahui besarnya pengenceran melalui angka KMnO_4 sebagai berikut:

$$P = \frac{\text{Angka KMnO}_4}{3 \text{ atau } 5}$$

2. Prosedur BOD dengan winkler

1. Menyiapkan 1 buah labu takar 500 mL dan tuangkan sampel sesuai dengan

perhitungan pengenceran, tambahkan air pengencer sampai batas labu.

2. Menyiapkan 2 buah botol winkler 300 mL dan 2 buah botol winkler 150 mL.

3. Menuangkan air dalam labu takar tadi ke dalam botol winkler 300 mL dan 150 mL sampai tumpah.

4. Menuangkan air pengencer ke botol winkler 300 mL dan 150 mL sebagai blanko sampai tumpah.

5. Memasukkan kedua botol winkler 300 mL ke dalam inkubator 20°C selama 5 hari.

6. Kedua botol winkler 150 mL yang berisi air dianalisis oksigen terlarutnya dengan prosedur sebagai berikut:

- Menambahkan 1 mL larutan Mangan Sulfat
- Menambahkan 1 mL larutan Pereaksi Oksigen
- Menutup Botol dengan hati-hati agar tidak ada gelembung udaranya lalu balik-balikkan beberapa kali.
- Membiarkan gumpalan mengendap selama 5-10 menit.
- Menambahkan 1 mL Asam Sulfat pekat, tutup dan balik-balikkan
- Menuangkan 100 mL larutan ke dalam erlenmeyer 250 mL
- Menambahkan 3-4 tetes indikator amilum dan titrasi dengan Natrium Tiosulfat hingga warna biru hilang

7. Setelah 5 hari, analisis kedua larutan dalam botol winkler 300 mL dengan analisis oksigen terlarut.

8. Hitung Oksigen Terlarut dan BOD dengan rumus berikut:

$$OT(mgO_2 / L) = \frac{axNx8000}{100ml}$$

$$BOD_5^{20}(mg / L) = \frac{[(X_0 - X_5) - (B_0 - B_5)] \times (1 - P)}{P}$$

$$P = \frac{mls sampel}{volumehasilpengenceran(500ml)}$$

Di mana:

X_0 = oksigen terlarut sampel pada $t = 0$

X_5 = oksigen terlarut sampel pada $t = 5$

B_0 = oksigen terlarut blanko pada $t = 0$

B_5 = oksigen terlarut blanko pada $t = 5$

P = derajat pengenceran

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

LAMPIRAN B DATA HASIL ANALISIS

Tabel LB. 1 Penyisihan COD Penelitian Pendahuluan

| Jam ke- | Q= 0,36 mL s ⁻¹ | Q= 0,7 mL s ⁻¹ |
|---------|----------------------------|---------------------------|
| | COD (g) | COD (g) |
| 0 | 10 | 10 |
| 12 | 3,68 | 3,22 |
| 15 | 3,15 | 2,25 |
| 24 | 2,1 | 1,26 |

Tabel LB.2 Penyisihan TDS untuk Debit 0,36 mL s⁻¹ Penelitian Pendahuluan

| Jam ke- | Q= 0,36 mL s ⁻¹ | | Q= 0,7 mL s ⁻¹ | |
|---------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | TDS Lindi (g) | TDS Konsentrat (g) | TDS Lindi (g) | TDS Konsentrat (g) |
| 0 | 5,925 | 0 | 5,925 | 0 |
| 3 | 3,9935 | 2,27115 | 3,087 | 1,4847 |
| 6 | 2,928 | 2,688 | 2,856 | 2,3736 |
| 9 | 1,9928 | 3,337 | 2,2466 | 3,2665 |
| 12 | 0,9062 | 3,887 | 1,035 | 3,726 |
| 15 | 0,6435 | 4,185 | 0,28575 | 4,095 |

| Jam ke- | Q= 0,36 mL s ⁻¹ | | Q= 0,7 mL s ⁻¹ | |
|---------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|
| | TDS Lindi (g) | TDS Konsentrat (g) | TDS Lindi (g) | TDS Konsentrat (g) |
| 24 | 0,2667 | 4,389 | 0,06447 | 4,116 |

Tabel LB. 3 Penyisihan Salinitas untuk Debit 0,7 mL s⁻¹ Penelitian Pendahuluan

| Jam ke- | Q= 0,36 mL s ⁻¹ | | Q= 0,7 mL s ⁻¹ | |
|---------|----------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| | Salinitas Lindi (ppt) | Salinitas Konsentrat (ppt) | Salinitas Lindi (ppt) | Salinitas Konsentrat (ppt) |
| 0 | 2,41 | 0 | 2,41 | 0 |
| 3 | 1,7 | 0,9 | 1,7 | 0,63 |
| 6 | 1,29 | 1,17 | 1,25 | 0,99 |
| 9 | 0,95 | 1,51 | 0,84 | 1,41 |
| 12 | 0,44 | 1,74 | 0,39 | 1,68 |
| 15 | 0,12 | 1,96 | 0,28 | 1,88 |
| 21 | 0,04 | 2,13 | 0,15 | 2,02 |
| 24 | 0,03 | 2,17 | 0,12 | 2,04 |

Tabel LB. 4 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Penelitian Pendahuluan

| Jam ke- | Q= 0,36 mL s ⁻¹ | | Q= 0,7 mL s ⁻¹ | |
|---------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| | Arus Listrik (Ampere) | Tegangan Listrik (Volt) | Arus Listrik (Ampere) | Tegangan Listrik (Volt) |
| 0 | 0,3 | 10,6 | 0,3 | 13,3 |
| 3 | 0,28 | 11 | 0,3 | 12,9 |
| 6 | 0,28 | 11,2 | 0,3 | 12,2 |
| 9 | 0,26 | 12,1 | 0,3 | 14,7 |
| 12 | 0,26 | 13,7 | 0,3 | 23,8 |
| 15 | 0,27 | 14,8 | 0,13 | 30,1 |
| 21 | 0,25 | 16,4 | 0,04 | 30,1 |
| 24 | 0,23 | 16 | 0,03 | 30,1 |

Tabel LB.5 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 8,9 | 0,25 | 13,1 |
| 0,31 | 0,25 | 8,4 | 0,25 | 10,5 |
| 0,57 | 0,25 | 10,2 | 0,25 | 11 |
| 0,85 | 0,25 | 11,7 | 0,25 | 12,6 |
| 1,14 | 0,25 | 17,4 | 0,25 | 15 |
| 1,33 | 0,25 | 17,6 | 0,25 | 15,2 |

Tabel LB.6 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 8,7 | 0,25 | 16,8 |
| 0,31 | 0,25 | 6,8 | 0,25 | 8,7 |
| 0,57 | 0,25 | 8,4 | 0,25 | 9,6 |
| 0,85 | 0,25 | 8,4 | 0,25 | 9,6 |
| 1,14 | 0,25 | 8,3 | 0,25 | 10,3 |
| 1,33 | 0,25 | 8,1 | 0,25 | 11,3 |

Tabel LB.7 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan III(pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 8,5 | 0,25 | 12,2 |
| 0,31 | 0,25 | 6,7 | 0,25 | 8,6 |
| 0,57 | 0,25 | 7 | 0,25 | 7,2 |
| 0,85 | 0,25 | 7,6 | 0,25 | 8,4 |
| 1,14 | 0,25 | 8,2 | 0,25 | 8,6 |
| 1,33 | 0,25 | 9 | 0,25 | 9 |

Tabel LB.8 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan IV(pH Awal 5,5 Tanpa Penambahan NaCl)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 12,9 | 0,25 | 20,4 |
| 0,31 | 0,25 | 9,1 | 0,25 | 8,1 |
| 0,57 | 0,25 | 7,9 | 0,25 | 7,5 |
| 0,85 | 0,25 | 9,2 | 0,25 | 8,8 |
| 1,14 | 0,25 | 11,1 | 0,25 | 11,2 |
| 1,33 | 0,25 | 11,4 | 0,25 | 12,5 |

Tabel LB.9 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan V (pH Awal 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 11,4 | 0,25 | 10,9 |
| 0,31 | 0,25 | 7,6 | 0,25 | 9,5 |
| 0,57 | 0,25 | 7,5 | 0,25 | 10,1 |
| 0,85 | 0,25 | 8,3 | 0,25 | 11 |
| 1,14 | 0,25 | 10,1 | 0,25 | 12,1 |
| 1,33 | 0,25 | 10,9 | 0,25 | 13,3 |

Tabel LB.10 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan VI (pH Awal 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|------------------|------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 10,6 | 0,25 | 11,4 |
| 0,31 | 0,25 | 6,6 | 0,25 | 8,6 |
| 0,57 | 0,25 | 6 | 0,25 | 7,2 |
| 0,85 | 0,25 | 6,5 | 0,25 | 6,9 |
| 1,14 | 0,25 | 7 | 0,25 | 7,2 |
| 1,33 | 0,25 | 7,4 | 0,25 | 7,7 |

Tabel LB.11 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan VII(pH Awal 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 11,3 | 0,25 | 15,2 |
| 0,31 | 0,25 | 7,6 | 0,25 | 8,3 |
| 0,57 | 0,25 | 8,6 | 0,25 | 8,9 |
| 0,85 | 0,25 | 10,1 | 0,25 | 9,8 |
| 1,14 | 0,25 | 14,6 | 0,25 | 10,8 |
| 1,33 | 0,25 | 16,1 | 0,25 | 11,9 |

Tabel LB.12 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan VIII(pH Awal 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 11,2 | 0,25 | 10,1 |
| 0,31 | 0,25 | 7,1 | 0,25 | 7,1 |
| 0,57 | 0,25 | 7,4 | 0,25 | 7,4 |
| 0,85 | 0,25 | 7,3 | 0,25 | 8,7 |
| 1,14 | 0,25 | 7,4 | 0,25 | 10 |
| 1,33 | 0,25 | 7,1 | 0,25 | 12,5 |

Tabel LB.13 Pencatatan Arus dan Tegangan Listrik Percobaan VIII(pH Awal 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | A | | Duplo | |
|--------------------------|-------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) | Arus Listrik (A) | Tegangan Listrik (V) |
| 0,00 | 0,25 | 8 | 0,25 | 8,7 |
| 0,31 | 0,25 | 7,1 | 0,25 | 8,2 |
| 0,57 | 0,25 | 6,9 | 0,25 | 8,4 |
| 0,85 | 0,25 | 6,9 | 0,25 | 9 |
| 1,14 | 0,25 | 7,5 | 0,25 | 10,3 |
| 1,33 | 0,25 | 8,1 | 0,25 | 10,5 |

Tabel LB.14 Pengukuran pH Percobaan I (pH Asli Lindi Tanpa Penambahan NaCl)

| pH | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 7,97 | 7,97 | 7,97 | 0,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 7,97 | 7,00 |
| 0,31 | 8,15 | 8,12 | 8,14 | 0,02 | 7,30 | 7,25 | 7,28 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,57 | 7,73 | 7,86 | 7,80 | 0,09 | 7,23 | 7,20 | 7,22 | 0,02 | N/A | N/A |
| 0,85 | 7,78 | 7,58 | 7,68 | 0,14 | 7,08 | 7,08 | 7,08 | 0,00 | 6,78 | 6,91 |
| 1,14 | 7,49 | 7,54 | 7,52 | 0,04 | 6,98 | 6,92 | 6,95 | 0,04 | N/A | N/A |
| 1,33 | 7,58 | 7,76 | 7,67 | 0,13 | 7,07 | 7,26 | 7,17 | 0,13 | 6,67 | 7,44 |

Tabel LB.15 Pengukuran pH Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 7,71 | 7,75 | 7,73 | 0,03 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 |
| 0,31 | 7,60 | 7,79 | 7,70 | 0,13 | 7,28 | 7,35 | 7,32 | 0,05 |
| 0,57 | 7,77 | 7,70 | 7,74 | 0,05 | 7,00 | 6,92 | 6,96 | 0,06 |
| 0,85 | 7,84 | 7,72 | 7,78 | 0,08 | 6,96 | 7,05 | 7,01 | 0,06 |
| 1,14 | 7,89 | 7,74 | 7,82 | 0,11 | 6,84 | 6,97 | 6,91 | 0,09 |
| 1,33 | 7,92 | 7,73 | 7,83 | 0,13 | 6,90 | 6,77 | 6,84 | 0,09 |

Tabel LB.16 Pengukuran pH Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 7,79 | 7,88 | 7,84 | 0,06 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 |
| 0,31 | 7,67 | 7,77 | 7,72 | 0,07 | 7,03 | 7,23 | 7,13 | 0,14 |
| 0,57 | 7,77 | 7,94 | 7,86 | 0,12 | 6,95 | 7,08 | 7,02 | 0,09 |
| 0,85 | 7,91 | 7,92 | 7,92 | 0,01 | 6,79 | 6,92 | 6,86 | 0,09 |
| 1,14 | 7,94 | 7,88 | 7,91 | 0,04 | 6,98 | 6,97 | 6,98 | 0,01 |
| 1,33 | 7,49 | 7,55 | 7,52 | 0,04 | 6,75 | 7,05 | 6,90 | 0,21 |

Tabel LB.17 Pengukuran pH Percobaan IV (pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl)

| pH | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 5,51 | 5,49 | 5,50 | 0,01 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 5,51 | 7,00 |
| 0,31 | 5,44 | 5,27 | 5,36 | 0,12 | 7,21 | 7,03 | 7,12 | 0,13 | N/A | N/A |
| 0,57 | 4,84 | 5,14 | 4,99 | 0,21 | 7,06 | 6,81 | 6,94 | 0,18 | N/A | N/A |
| 0,85 | 4,55 | 4,71 | 4,63 | 0,11 | 4,31 | 4,40 | 4,36 | 0,06 | 5,62 | 7,26 |
| 1,14 | 4,47 | 4,61 | 4,54 | 0,10 | 4,11 | 4,29 | 4,20 | 0,13 | N/A | N/A |
| 1,33 | 4,40 | 4,05 | 4,23 | 0,25 | 4,23 | 4,37 | 4,30 | 0,10 | 5,49 | 7,30 |

Tabel LB.18 Pengukuran pH Percobaan V (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 5,50 | 5,50 | 5,50 | 0,00 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 5,50 | 7,00 |
| 0,31 | 5,49 | 5,41 | 5,45 | 0,06 | 6,18 | 6,17 | 6,18 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,57 | 5,26 | 5,43 | 5,35 | 0,12 | 6,23 | 6,26 | 6,25 | 0,02 | N/A | N/A |
| 0,85 | 4,96 | 5,38 | 5,17 | 0,30 | 6,66 | 6,59 | 6,63 | 0,05 | 5,82 | 7,58 |
| 1,14 | 3,79 | 4,56 | 4,18 | 0,54 | 6,49 | 6,47 | 6,48 | 0,01 | N/A | N/A |
| 1,33 | 3,58 | 4,44 | 4,01 | 0,61 | 6,35 | 6,41 | 6,38 | 0,04 | 5,56 | 7,57 |

Tabel LB.19 Pengukuran pH Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 5,48 | 5,53 | 5,51 | 0,04 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 5,48 | 7,00 |
| 0,31 | 5,46 | 5,49 | 5,48 | 0,02 | 5,92 | 5,20 | 5,56 | 0,51 | N/A | N/A |
| 0,57 | 5,40 | 5,24 | 5,32 | 0,11 | 4,53 | 5,34 | 4,94 | 0,57 | N/A | N/A |
| 0,85 | 4,62 | 4,73 | 4,68 | 0,08 | 4,46 | 5,43 | 4,95 | 0,69 | 5,63 | 6,41 |
| 1,14 | 4,50 | 4,37 | 4,44 | 0,09 | 5,05 | 4,69 | 4,87 | 0,25 | N/A | N/A |
| 1,33 | 4,45 | 4,26 | 4,36 | 0,13 | 5,07 | 5,20 | 5,14 | 0,09 | 5,71 | 6,27 |

Tabel LB.20 Pengukuran pH Percobaan VII (pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl)

| pH | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 8,56 | 8,52 | 8,54 | 0,03 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 8,56 | 7,00 |
| 0,31 | 7,47 | 7,85 | 7,66 | 0,27 | 7,79 | 7,30 | 7,55 | 0,35 | N/A | N/A |
| 0,57 | 7,13 | 7,69 | 7,41 | 0,40 | 7,95 | 7,94 | 7,95 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,85 | 7,20 | 7,37 | 7,29 | 0,12 | 8,40 | 7,00 | 7,70 | 0,99 | 7,60 | 7,93 |
| 1,14 | 7,10 | 7,41 | 7,26 | 0,22 | 8,51 | 7,11 | 7,81 | 0,99 | N/A | N/A |
| 1,33 | 6,16 | 7,90 | 7,03 | 1,23 | 8,40 | 7,20 | 7,80 | 0,85 | 7,17 | 7,12 |

Tabel LB.21 Pengukuran pH Percobaan VIII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 8,49 | 8,48 | 8,49 | 0,01 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 8,51 | 7,00 |
| 0,31 | 8,05 | 8,26 | 8,16 | 0,15 | 7,25 | 7,64 | 7,45 | 0,28 | N/A | N/A |
| 0,57 | 7,49 | 7,95 | 7,72 | 0,33 | 7,98 | 8,17 | 8,08 | 0,13 | N/A | N/A |
| 0,85 | 7,55 | 7,16 | 7,36 | 0,28 | 6,93 | 8,13 | 7,53 | 0,85 | 8,52 | 7,71 |
| 1,14 | 7,78 | 7,24 | 7,51 | 0,38 | 7,25 | 7,72 | 7,49 | 0,33 | N/A | N/A |
| 1,33 | 7,93 | 7,17 | 7,55 | 0,54 | 6,74 | 7,23 | 6,99 | 0,35 | 8,52 | 7,39 |

Tabel LB.22 Pengukuran pH Percobaan IX (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| pH | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 8,50 | 8,52 | 8,51 | 0,01 | 7,00 | 7,00 | 7,00 | 0,00 | 8,47 | 7,00 |
| 0,31 | 7,98 | 7,90 | 7,94 | 0,06 | 8,16 | 7,64 | 7,90 | 0,37 | N/A | N/A |
| 0,57 | 7,28 | 7,50 | 7,39 | 0,16 | 7,87 | 8,17 | 8,02 | 0,21 | N/A | N/A |
| 0,85 | 6,84 | 6,87 | 6,86 | 0,02 | 7,58 | 8,13 | 7,86 | 0,39 | 8,47 | 7,67 |
| 1,14 | 6,89 | 6,77 | 6,83 | 0,08 | 7,28 | 7,72 | 7,50 | 0,31 | N/A | N/A |
| 1,33 | 6,62 | 6,79 | 6,71 | 0,12 | 7,37 | 7,23 | 7,30 | 0,10 | 8,47 | 8,33 |

Tabel LB.23 Pengukuran TDS Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 5,55 | 5,58 | 5,56 | 0,02 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 5,55 | 0,007 |
| 0,31 | 3,97 | 4,12 | 4,04 | 0,10 | 1,85 | 1,68 | 1,76 | 0,12 | N/A | N/A |
| 0,57 | 3,02 | 3,19 | 3,11 | 0,12 | 2,71 | 2,42 | 2,57 | 0,20 | N/A | N/A |
| 0,85 | 2,44 | 2,77 | 2,61 | 0,23 | 3,13 | 2,80 | 2,96 | 0,23 | 5,12 | 0,008 |
| 1,14 | 1,49 | 1,73 | 1,61 | 0,17 | 4,00 | 3,70 | 3,85 | 0,21 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,00 | 1,34 | 1,17 | 0,24 | 4,28 | 3,89 | 4,08 | 0,27 | 4,91 | 0,007 |

Tabel LB.24 Pengukuran TDS Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 6,98 | 7,13 | 7,05 | 0,11 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| 0,31 | 4,90 | 5,12 | 5,01 | 0,16 | 1,70 | 1,83 | 1,77 | 0,09 |
| 0,57 | 4,27 | 4,15 | 4,21 | 0,08 | 2,66 | 2,90 | 2,78 | 0,17 |
| 0,85 | 3,03 | 3,27 | 3,15 | 0,17 | 3,85 | 3,97 | 3,91 | 0,08 |
| 1,14 | 2,48 | 2,48 | 2,48 | 0,00 | 4,65 | 4,65 | 4,65 | 0,00 |
| 1,33 | 2,81 | 2,18 | 2,50 | 0,44 | 4,88 | 5,02 | 4,95 | 1,69 |

Tabel LB.25 Pengukuran TDS Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| TDS (g) | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 8,48 | 9,00 | 8,74 | 0,37 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| 0,31 | 7,08 | 7,23 | 7,15 | 0,10 | 1,72 | 1,46 | 1,59 | 0,18 |
| 0,57 | 5,83 | 6,31 | 6,07 | 0,34 | 2,62 | 2,35 | 2,48 | 0,19 |
| 0,85 | 4,79 | 5,31 | 5,05 | 0,37 | 3,62 | 3,08 | 3,35 | 0,38 |
| 1,14 | 3,73 | 4,26 | 3,99 | 0,37 | 4,65 | 4,03 | 4,34 | 0,44 |
| 1,33 | 3,17 | 3,74 | 3,45 | 0,40 | 5,15 | 4,32 | 4,74 | 0,59 |

Tabel LB.26 Pengukuran TDS Percobaan IV (pH Awal Proses 5,5 Tanpa Penambahan NaCl)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 5,88 | 5,83 | 5,85 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 5,88 | 0,000 |
| 0,31 | 4,17 | 3,94 | 4,05 | 0,16 | 1,62 | 1,59 | 1,61 | 0,03 | N/A | N/A |
| 0,57 | 3,50 | 3,41 | 3,46 | 0,07 | 2,40 | 2,45 | 2,42 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,85 | 3,03 | 3,01 | 3,02 | 0,02 | 3,95 | 3,31 | 3,63 | 0,45 | 4,91 | 0,094 |
| 1,14 | 2,32 | 2,42 | 2,37 | 0,07 | 4,14 | 4,00 | 4,07 | 0,10 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,33 | 1,40 | 1,36 | 0,05 | 4,34 | 4,21 | 4,28 | 0,10 | 4,77 | 0,096 |

Tabel LB.27 Pengukuran TDS Percobaan V (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 6,93 | 7,03 | 6,98 | 0,07 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 6,93 | 0,000 |
| 0,31 | 5,64 | 4,83 | 5,23 | 0,57 | 1,42 | 1,37 | 1,40 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,57 | 4,58 | 3,84 | 4,21 | 0,53 | 2,42 | 2,30 | 2,36 | 0,09 | N/A | N/A |
| 0,85 | 3,53 | 2,94 | 3,23 | 0,42 | 3,36 | 3,13 | 3,24 | 0,17 | 6,35 | 0,108 |
| 1,14 | 2,65 | 2,37 | 2,51 | 0,20 | 4,26 | 3,91 | 4,08 | 0,24 | N/A | N/A |
| 1,33 | 2,27 | 2,07 | 2,17 | 0,14 | 4,64 | 4,37 | 4,50 | 0,19 | 6,14 | 0,090 |

Tabel LB.28 Pengukuran TDS Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 9,18 | 9,28 | 9,23 | 0,07 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 9,18 | 0,000 |
| 0,31 | 7,79 | 7,84 | 7,82 | 0,03 | 1,51 | 1,52 | 1,52 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,57 | 6,77 | 6,72 | 6,74 | 0,03 | 2,47 | 2,21 | 2,34 | 0,19 | N/A | N/A |
| 0,85 | 5,88 | 5,85 | 5,86 | 0,02 | 3,48 | 3,06 | 3,27 | 0,30 | 8,70 | 0,174 |
| 1,14 | 4,72 | 4,88 | 4,80 | 0,11 | 4,65 | 3,91 | 4,28 | 0,52 | N/A | N/A |
| 1,33 | 3,35 | 3,24 | 3,30 | 0,08 | 5,24 | 4,41 | 4,83 | 0,59 | 8,30 | 0,110 |

Tabel LB.29 Pengukuran TDS Percobaan VII (pH Awal Proses 8,5 Tanpa Penambahan NaCl)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 5,58 | 5,50 | 5,54 | 0,05 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,58 | 0,000 |
| 0,31 | 4,31 | 4,39 | 4,35 | 0,05 | 1,50 | 1,53 | 1,52 | 0,03 | N/A | N/A |
| 0,57 | 3,22 | 3,79 | 3,50 | 0,41 | 2,42 | 2,16 | 2,29 | 0,19 | N/A | N/A |
| 0,85 | 2,33 | 3,01 | 2,67 | 0,48 | 3,13 | 2,80 | 2,96 | 0,23 | 5,24 | 0,061 |
| 1,14 | 1,67 | 2,48 | 2,08 | 0,57 | 3,84 | 3,40 | 3,62 | 0,31 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,25 | 2,11 | 1,68 | 0,61 | 4,12 | 3,56 | 3,84 | 0,40 | 4,95 | 0,065 |

Tabel LB.30 Pengukuran TDS Percobaan VIII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 6,43 | 6,53 | 6,48 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,43 | 0,000 |
| 0,31 | 5,27 | 5,29 | 5,28 | 0,02 | 1,49 | 0,13 | 0,81 | 0,96 | N/A | N/A |
| 0,57 | 4,78 | 4,34 | 4,56 | 0,31 | 2,36 | 2,74 | 2,55 | 0,26 | N/A | N/A |
| 0,85 | 4,37 | 3,38 | 3,88 | 0,70 | 2,75 | 2,84 | 2,80 | 0,07 | 5,92 | 0,120 |
| 1,14 | 4,09 | 2,60 | 3,35 | 1,06 | 3,08 | 3,22 | 3,15 | 0,10 | N/A | N/A |
| 1,33 | 3,80 | 2,07 | 2,94 | 1,22 | 3,20 | 3,60 | 3,40 | 0,29 | 5,67 | 0,081 |

Tabel LB.31 Pengukuran TDS Percobaan IX (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| TDS (g) | | | | | | | | | | |
|------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 8,35 | 8,20 | 8,28 | 0,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 8,35 | 0,000 |
| 0,31 | 6,88 | 6,39 | 6,64 | 0,35 | 1,47 | 1,47 | 1,47 | 0,00 | N/A | N/A |
| 0,57 | 5,95 | 5,45 | 5,70 | 0,36 | 2,45 | 2,59 | 2,52 | 0,10 | N/A | N/A |
| 0,85 | 4,96 | 4,47 | 4,71 | 0,35 | 3,24 | 3,48 | 3,36 | 0,17 | 7,54 | 0,120 |
| 1,14 | 3,89 | 3,43 | 3,66 | 0,33 | 4,16 | 4,44 | 4,30 | 0,20 | N/A | N/A |
| 1,33 | 3,04 | 3,33 | 3,18 | 0,21 | 4,86 | 4,50 | 4,68 | 0,25 | 7,11 | 0,081 |

Tabel LB.32 Hasil Analisis Klorida Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 5,13 | 5,40 | 5,27 | 0,19 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,13 | 0,00 |
| 0,31 | 4,59 | 5,12 | 4,85 | 0,37 | 0,37 | 0,35 | 0,36 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,57 | 2,42 | 2,33 | 2,38 | 0,06 | 0,55 | 0,50 | 0,53 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,85 | 2,03 | 2,03 | 2,03 | 0,00 | 0,59 | 0,58 | 0,58 | 0,01 | 4,74 | 0,05 |
| 1,14 | 1,49 | 1,66 | 1,57 | 0,12 | 0,76 | 0,71 | 0,74 | 0,04 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,97 | 1,05 | 1,01 | 0,06 | 0,78 | 0,73 | 0,75 | 0,03 | 4,54 | 0,05 |

Tabel LB.33 Hasil Analisis Klorida Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|--|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | |
| 0,00 | 6,57 | 6,93 | 6,75 | 0,25 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| 0,31 | 5,82 | 5,47 | 5,64 | 0,25 | 1,04 | 1,85 | 1,45 | 0,57 | |
| 0,57 | 2,85 | 3,02 | 2,94 | 0,12 | 1,73 | 2,16 | 1,94 | 0,31 | |
| 0,85 | 1,95 | 2,28 | 2,12 | 0,24 | 2,40 | 2,96 | 2,68 | 0,39 | |
| 1,14 | 1,74 | 1,90 | 1,82 | 0,12 | 2,70 | 3,23 | 2,96 | 0,37 | |
| 1,33 | 1,38 | 1,54 | 1,46 | 0,11 | 3,05 | 3,56 | 3,30 | 0,37 | |

Tabel LB.34 Hasil Analisis Klorida Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 8,33 | 8,93 | 8,63 | 0,42 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,31 | 6,83 | 6,58 | 6,71 | 0,18 | 1,42 | 1,50 | 1,46 | 0,06 |
| 0,57 | 3,35 | 3,84 | 3,59 | 0,35 | 1,71 | 1,96 | 1,84 | 0,17 |
| 0,85 | 2,72 | 3,12 | 2,92 | 0,28 | 2,40 | 2,16 | 2,28 | 0,17 |
| 1,14 | 2,03 | 2,50 | 2,27 | 0,33 | 2,66 | 2,82 | 2,74 | 0,11 |
| 1,33 | 1,61 | 1,91 | 1,76 | 0,22 | 3,21 | 3,06 | 3,14 | 0,11 |

Tabel LB.35 Hasil Analisis Klorida Percobaan IV (pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | |
| 0,00 | 5,84 | 5,75 | 5,80 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,84 | 0,00 |
| 0,31 | 4,51 | 4,68 | 4,60 | 0,12 | 2,25 | 1,47 | 1,86 | 0,55 | N/A | N/A |
| 0,57 | 2,29 | 2,12 | 2,21 | 0,12 | 2,29 | 2,46 | 2,38 | 0,12 | N/A | N/A |
| 0,85 | 2,00 | 1,91 | 1,95 | 0,06 | 2,83 | 2,91 | 2,87 | 0,06 | 5,49 | 0,92 |
| 1,14 | 1,63 | 1,47 | 1,55 | 0,12 | 3,42 | 3,09 | 3,26 | 0,23 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,35 | 1,04 | 1,19 | 0,23 | 3,42 | 3,27 | 3,35 | 0,11 | 5,18 | 0,88 |

Tabel LB.36 Hasil Analisis Klorida Percobaan V (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 6,84 | 6,58 | 6,71 | 0,18 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,84 | 0,00 |
| 0,31 | 5,26 | 5,60 | 5,43 | 0,24 | 1,70 | 1,44 | 1,57 | 0,18 | N/A | N/A |
| 0,57 | 2,58 | 2,66 | 2,62 | 0,06 | 1,99 | 1,91 | 1,95 | 0,06 | N/A | N/A |
| 0,85 | 1,95 | 2,03 | 1,99 | 0,06 | 2,20 | 2,12 | 2,16 | 0,06 | 6,27 | 0,90 |
| 1,14 | 1,67 | 1,67 | 1,67 | 0,00 | 2,71 | 2,47 | 2,59 | 0,17 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,48 | 1,48 | 1,48 | 0,00 | 2,81 | 2,73 | 2,77 | 0,06 | 6,00 | 0,86 |

Tabel LB.37 Hasil Analisis Klorida Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 9,00 | 9,18 | 9,09 | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 9,00 | 0,00 |
| 0,31 | 7,30 | 6,28 | 6,79 | 0,72 | 1,70 | 1,44 | 1,57 | 0,18 | N/A | N/A |
| 0,57 | 4,24 | 3,99 | 4,11 | 0,18 | 1,99 | 1,91 | 1,95 | 0,06 | N/A | N/A |
| 0,85 | 3,34 | 3,50 | 3,42 | 0,12 | 2,20 | 2,12 | 2,16 | 0,06 | 8,46 | 0,90 |
| 1,14 | 2,55 | 2,55 | 2,55 | 0,00 | 2,71 | 2,47 | 2,59 | 0,17 | N/A | N/A |
| 1,33 | 2,03 | 2,18 | 2,10 | 0,11 | 2,81 | 2,73 | 2,77 | 0,06 | 7,87 | 0,86 |

Tabel LB.38 Hasil Analisis Klorida PercobaanVII (pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 5,34 | 5,26 | 5,30 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 5,34 | 0,00 |
| 0,31 | 3,72 | 2,87 | 3,29 | 0,60 | 1,44 | 1,77 | 1,61 | 0,24 | N/A | N/A |
| 0,57 | 2,32 | 2,23 | 2,28 | 0,06 | 1,90 | 1,90 | 1,90 | 0,00 | N/A | N/A |
| 0,85 | 1,86 | 1,94 | 1,90 | 0,06 | 2,51 | 2,03 | 2,27 | 0,34 | 4,86 | 0,89 |
| 1,14 | 1,27 | 1,43 | 1,35 | 0,11 | 3,01 | 2,22 | 2,62 | 0,56 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,09 | 1,09 | 1,09 | 0,00 | 3,03 | 2,48 | 2,75 | 0,38 | 4,58 | 0,85 |

Tabel LB.39 Hasil Analisis Klorida Percobaan VIII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 6,38 | 6,48 | 6,43 | 0,07 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 6,38 | 0,00 |
| 0,31 | 4,48 | 4,11 | 4,29 | 0,26 | 0,75 | 0,75 | 0,75 | 0,00 | N/A | N/A |
| 0,57 | 2,83 | 2,65 | 2,74 | 0,13 | 2,29 | 1,65 | 1,97 | 0,45 | N/A | N/A |
| 0,85 | 2,69 | 1,97 | 2,33 | 0,51 | 2,60 | 2,42 | 2,51 | 0,13 | 5,91 | 0,54 |
| 1,14 | 2,28 | 1,58 | 1,93 | 0,50 | 2,63 | 2,45 | 2,54 | 0,12 | N/A | N/A |
| 1,33 | 1,54 | 1,20 | 1,37 | 0,24 | 3,00 | 2,91 | 2,96 | 0,06 | 5,66 | 0,51 |

Tabel LB.40 Hasil Analisis Klorida Percobaan IX (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Cl ⁻ (g) | | | | | | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|-------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 8,32 | 7,92 | 8,12 | 0,28 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 8,32 | 0,00 |
| 0,31 | 6,55 | 5,82 | 6,19 | 0,51 | 1,94 | 2,13 | 2,04 | 0,14 | N/A | N/A |
| 0,57 | 4,56 | 4,37 | 4,47 | 0,13 | 2,47 | 2,28 | 2,38 | 0,13 | N/A | N/A |
| 0,85 | 3,91 | 3,16 | 3,54 | 0,53 | 2,98 | 3,35 | 3,16 | 0,26 | 7,63 | 1,12 |
| 1,14 | 2,91 | 2,91 | 2,91 | 0,00 | 4,01 | 4,19 | 4,10 | 0,13 | N/A | N/A |
| 1,33 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 0,00 | 4,46 | 4,46 | 4,46 | 0,00 | 7,13 | 1,07 |

Tabel LB.41 Hasil Analisis COD Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|------|---------|-------------------|--------|--------|-----------|-------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 10,8 | 11,7 | 11,25 | 0,63 | 10,80 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,31 | 9,70 | 8,82 | 9,26 | 0,62 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 8,64 | 6,048 | 7,34 | 1,83 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 7,19 | 5,076 | 6,13 | 1,49 | 9,31 | 0,85 | 0,0857 | 0,0646 | 0,08 | 0,015 | 0,00 |
| 1,14 | 6,62 | 4,554 | 5,59 | 1,46 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 2,83 | 3,24 | 3,04 | 0,28 | 8,10 | 1,33 | 0,0921 | 0,0618 | 0,08 | 0,021 | 0,00 |

Tabel LB.42 Hasil Analisis COD Percobaan I IpH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | Total Klorin (mg) | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|-------|-------------------|--------|--------|-----------|-------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | (Ah/L) | A | Duplo | | |
| 0,00 | 10,35 | 11,25 | 10,80 | 0,636 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,000 |
| 0,31 | 5,292 | 6,615 | 5,95 | 0,936 | | | | | |
| 0,57 | 3,456 | 5,184 | 4,32 | 1,222 | | | | | |
| 0,85 | 2,961 | 3,807 | 3,38 | 0,598 | 0,85 | 0,0856 | 0,1080 | 0,10 | 0,016 |
| 1,14 | 2,484 | 2,898 | 2,69 | 0,293 | | | | | |
| 1,33 | 1,62 | 2,025 | 1,82 | 0,286 | | | | | |
| | | | | | 1,33 | 0,0921 | 0,1690 | 0,13 | 0,054 |

Tabel LB.43 Hasil Analisis COD Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | Total Klorin (mg) | | | | |
|---------|---------|--------|-----------|-------|-------------------|-------------|-------------|-----------|-------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | (Ah/L) | A | Duplo | | |
| 0,00 | 11,44 | 11,44 | 11,44 | 0,000 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,000 |
| 0,31 | 10,3488 | 9,4864 | 9,92 | 0,610 | | | | | |
| 0,57 | 5,0688 | 3,3792 | 4,22 | 1,195 | | | | | |
| 0,85 | 4,136 | 2,4816 | 3,31 | 1,170 | 0,85 | 0,063264162 | 0,063264162 | 0,06 | 0,000 |
| 1,14 | 3,6432 | 2,024 | 2,83 | 1,145 | | | | | |
| 1,33 | 1,584 | 1,584 | 1,58 | 0,000 | | | | | |
| | | | | | 1,33 | 0,161525519 | 0,169097027 | 0,17 | 0,005 |

Tabel LB.44Hasil Analisis COD PercobaanIV (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|------|---------|-------------------|-------|--------|-----------|-------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 11,2 | 10,4 | 10,80 | 0,56 | 11,20 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,000 | 0,00 |
| 0,31 | 6,27 | 5,48 | 5,88 | 0,55 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 5,37 | 4,99 | 5,18 | 0,27 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 4,51 | 4,51 | 4,51 | 0,00 | 7,52 | 0,85 | 0,108 | 0,0791 | 0,09 | 0,021 | 0,00 |
| 1,14 | 4,04 | 3,68 | 3,86 | 0,26 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 2,88 | 2,52 | 2,70 | 0,25 | 7,20 | 1,33 | 0,183 | 0,1603 | 0,17 | 0,016 | 0,00 |

Tabel LB.45 Hasil Analisis COD PercobaanV (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|------|---------|-------------------|-----------|-------|-----------|-----------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 11,2 | 9,6 | 10,40 | 1,13 | 11,20 | 0,00 | 0 | 0 | 0,00 | 0,00 0 | 0,00 |
| 0,31 | 10,19 | 8,62 | 9,41 | 1,10 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 8,06 | 6,91 | 7,49 | 0,81 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 6,01 | 5,64 | 5,83 | 0,26 | 9,78 | 0,85 | 0,13 5 | 0,14 | 0,14 | 0,00 7 | 0,00 |
| 1,14 | 4,78 | 4,41 | 4,60 | 0,26 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 3,24 | 2,88 | 3,06 | 0,25 | 9,36 | 1,33 | 0,16 0 | 0,162 | 0,16 | 0,00 2 | 0,00 |

Tabel LB.46 Hasil Analisis COD Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|------|---------|-------------------|-------|--------|-----------|-------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 12,24 | 12,24 | 12,24 | 0,00 | 12,24 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,31 | 8,80 | 9,60 | 9,20 | 0,56 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 3,92 | 7,44 | 5,68 | 2,49 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 3,45 | 6,14 | 4,80 | 1,89 | 9,98 | 0,85 | 0,12 | 0,123 | 0,13 | 0,003 | 0,00 |
| 1,14 | 3,00 | 4,88 | 3,94 | 1,32 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 2,57 | 3,31 | 2,94 | 0,52 | 9,55 | 1,33 | 0,165 | 0,181 | 0,17 | 0,012 | 0,00 |

Tabel LB.47 Hasil Analisis COD Percobaan VII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|-----------|---------|-------------------|-------|-------|-----------|-----------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 11,43 | 11,43 | 11,43 | 0,00 0 | 11,43 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 0 | 0,00 |
| 0,31 | 10,40 | 8,00 | 9,20 | 1,69 7 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 9,01 | 9,80 | 9,40 | 0,55 4 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 6,52 | 8,82 | 7,67 | 1,62 8 | 8,44 | 0,85 | 0,039 | 0,039 | 0,04 | 0,00 0 | 0,00 |
| 1,14 | 3,38 | 6,38 | 4,88 | 2,12 4 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 2,94 | 3,31 | 3,12 | 0,26 0 | 8,08 | 1,33 | 0,039 | 0,039 | 0,04 | 0,00 0 | 0,00 |

Tabel LB.48 Hasil Analisis COD Percobaan VIII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|-------|-------------------|--------|-------|-------|-----------|-------|---------|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL |
| 0,00 | 14,34 | 13,58 | 13,96 | 0,534 | 14,34 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,31 | 8,88 | 11,09 | 9,98 | 1,569 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,57 | 2,90 | 5,43 | 4,17 | 1,793 | N/A | | | | | | N/A |
| 0,85 | 5,68 | 4,61 | 5,14 | 0,752 | 12,77 | 0,85 | 0,039 | 0,037 | 0,04 | 0,001 | 0,00 |
| 1,14 | 4,17 | 3,82 | 3,99 | 0,245 | N/A | | | | | | N/A |
| 1,33 | 3,74 | 2,72 | 3,23 | 0,720 | 11,55 | 1,33 | 0,041 | 0,039 | 0,04 | 0,001 | 0,00 |

Tabel LB.49 Hasil Analisis COD Percobaan IX (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| COD (g) | | | | | | Total Klorin (mg) | | | | | | |
|---------|-------|-------|-----------|-------|---------|-------------------|-------|-------|-----------|-------|---------|--|
| Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | Energi | LINDI | | Rata-rata | SD | LINDI | |
| (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | (Ah/L) | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 13,21 | 14,15 | 13,68 | 0,667 | 13,21 | 0,00 | 0,000 | 0,000 | 0,00 | 0,000 | 0,00 | |
| 0,31 | 8,32 | 12,94 | 10,63 | 3,269 | N/A | | | | | | N/A | |
| 0,57 | 13,04 | 6,52 | 9,78 | 4,611 | N/A | | | | | | N/A | |
| 0,85 | 10,64 | 9,93 | 10,29 | 0,502 | 11,53 | 0,85 | 0,035 | 0,033 | 0,03 | 0,001 | 0,00 | |
| 1,14 | 6,25 | 5,55 | 5,90 | 0,491 | N/A | | | | | | N/A | |
| 1,33 | 3,40 | 2,04 | 2,72 | 0,961 | 11,04 | 1,33 | 0,035 | 0,034 | 0,04 | 0,001 | 0,00 | |

Tabel LB.50 Hasil Analisis Ammonium Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| NH ₄ ⁺ (g) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 0,50 | 0,44 | 0,47 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,000 |
| 0,31 | 0,33 | 0,31 | 0,32 | 0,01 | 0,10 | 0,00 | 0,05 | 0,07 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,19 | 0,26 | 0,23 | 0,05 | 0,10 | 0,00 | 0,05 | 0,07 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,18 | 0,19 | 0,19 | 0,01 | 0,11 | 0,00 | 0,05 | 0,08 | 0,14 | 10,321 |
| 1,14 | 0,12 | 0,14 | 0,13 | 0,01 | 0,19 | 0,00 | 0,10 | 0,14 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,10 | 0,07 | 0,08 | 0,02 | 0,21 | 0,00 | 0,11 | 0,15 | 0,09 | 8,361 |

Tabel LB.51 Hasil Analisis Ammonium Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| NH ₄ ⁺ (g) | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|--|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | |
| 0,00 | 0,44 | 0,41 | 0,42 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | |
| 0,31 | 0,38 | 0,32 | 0,35 | 0,04 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,02 | |
| 0,57 | 0,12 | 0,18 | 0,15 | 0,04 | 0,13 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | |
| 0,85 | 0,11 | 0,15 | 0,13 | 0,03 | 0,14 | 0,12 | 0,13 | 0,02 | |
| 1,14 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,00 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,00 | |
| 1,33 | 0,08 | 0,06 | 0,07 | 0,01 | 0,23 | 0,18 | 0,21 | 0,03 | |

Tabel LB.52 Hasil Analisis Ammonium Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| NH₄⁺(g) | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------------|-----------|-------------------|--------------|------------------|-----------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | |
| 0,00 | 0,54 | 0,57 | 0,55 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 0,31 | 0,31 | 0,32 | 0,31 | 0,01 | 0,13 | 0,03 | 0,08 | 0,07 |
| 0,57 | 0,23 | 0,29 | 0,26 | 0,04 | 0,18 | 0,12 | 0,15 | 0,05 |
| 0,85 | 0,20 | 0,19 | 0,19 | 0,01 | 0,22 | 0,16 | 0,19 | 0,04 |
| 1,14 | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,00 | 0,30 | 0,19 | 0,25 | 0,08 |
| 1,33 | 0,09 | 0,08 | 0,09 | 0,01 | 0,19 | 0,20 | 0,19 | 0,00 |

Tabel LB.53 Hasil Analisis Ammonium Percobaan IV (pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| NH₄⁺(g) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------------|-----------|-------------------|--------------|------------------|-----------|----------------|-------------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 0,40 | 0,35 | 0,38 | 0,03 | 0,00 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,40 | 0,000 |
| 0,31 | 0,31 | 0,26 | 0,29 | 0,03 | 0,01 | 0,016 | 0,02 | 0,00 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,20 | 0,17 | 0,18 | 0,02 | 0,01 | 0,019 | 0,02 | 0,00 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,12 | 0,14 | 0,13 | 0,01 | 0,04 | 0,057 | 0,05 | 0,01 | 0,11 | 0,992 |
| 1,14 | 0,11 | 0,10 | 0,10 | 0,01 | 0,06 | 0,058 | 0,06 | 0,00 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,00 | 0,07 | 0,066 | 0,07 | 0,00 | 0,12 | 0,570 |

Tabel LB.54 Hasil Analisis Ammonium Percobaan V (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| NH ₄ ⁺ (g) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-----------|------|------------|-------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 0,45 | 0,48 | 0,47 | 0,02 | 0,00 | 0,000 | 0,00 | 0,00 | 0,45 | 0,000 |
| 0,31 | 0,27 | 0,21 | 0,24 | 0,04 | 0,07 | 0,002 | 0,04 | 0,05 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,00 | 0,10 | 0,002 | 0,05 | 0,07 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,15 | 0,18 | 0,16 | 0,02 | 0,16 | 0,002 | 0,08 | 0,11 | 0,42 | 15,878 |
| 1,14 | 0,13 | 0,15 | 0,14 | 0,02 | 0,16 | 0,002 | 0,08 | 0,11 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,12 | 0,13 | 0,13 | 0,01 | 0,18 | 0,002 | 0,09 | 0,13 | 0,42 | 14,823 |

Tabel LB.55 Hasil Analisis Ammonium Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| NH ₄ ⁺ (g) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-----------|------|------------|--------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 0,51 | 0,49 | 0,50 | 0,01 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,51 | 0,000 |
| 0,31 | 0,41 | 0,40 | 0,41 | 0,01 | 0,06 | 0,0003 | 0,03 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,24 | 0,29 | 0,26 | 0,03 | 0,06 | 0,0007 | 0,03 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,16 | 0,18 | 0,17 | 0,01 | 0,15 | 0,0009 | 0,08 | 0,11 | 0,31 | 25,802 |
| 1,14 | 0,15 | 0,13 | 0,14 | 0,01 | 0,15 | 0,0004 | 0,08 | 0,11 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,13 | 0,09 | 0,11 | 0,03 | 0,15 | 0,0005 | 0,07 | 0,10 | 0,29 | 21,664 |

Tabel LB.56 Hasil Analisis Ammonium Percobaan VII (pH Awal Proses 8,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| NH₄⁺(g) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------------|-----------|-------------------|--------------|------------------|-----------|--------------|-------------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 0,49 | 0,49 | 0,49 | 0,00 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,49 | 0,000 |
| 0,31 | 0,21 | 0,16 | 0,19 | 0,03 | 0,01 | 0,0261 | 0,02 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,04 | 0,08 | 0,06 | 0,03 | 0,01 | 0,0288 | 0,02 | 0,01 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,00 | 0,01 | 0,0417 | 0,03 | 0,02 | 0,40 | 25,802 |
| 1,14 | 0,06 | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,04 | 0,0831 | 0,06 | 0,03 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,05 | 0,05 | 0,05 | 0,00 | 0,14 | 0,0882 | 0,12 | 0,04 | 0,39 | 21,664 |

Tabel LB.57 Hasil Analisis Ammonium Percobaan VIII (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| NH₄⁺(g) | | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|--------------|--------------|------------------|-----------|-------------------|--------------|------------------|-----------|--------------|-------------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | | KONTROL |
| 0,00 | 0,49 | 0,48 | 0,48 | 0,01 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,49 | 0,000 |
| 0,31 | 0,13 | 0,12 | 0,12 | 0,01 | 0,30 | 0,2686 | 0,29 | 0,02 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,09 | 0,11 | 0,10 | 0,01 | 0,33 | 0,2781 | 0,31 | 0,04 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,05 | 0,07 | 0,06 | 0,01 | 0,37 | 0,2810 | 0,33 | 0,06 | 0,46 | 25,802 |
| 1,14 | 0,00 | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,25 | 0,2401 | 0,25 | 0,01 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,04 | 0,03 | 0,03 | 0,00 | 0,32 | 0,3231 | 0,32 | 0,01 | 0,36 | 21,664 |

Tabel LB.58 Hasil Analisis Ammonium Percobaan IX (pH Awal Proses 8,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| NH ₄ ⁺ (g) | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|-------|-----------|------|------------|--------|-----------|------|---------|------------|
| Energi (Ah/L) | LINDI | | Rata-rata | SD | KONSENTRAT | | Rata-rata | SD | LINDI | KONSENTRAT |
| | A | Duplo | | | A | Duplo | | | KONTROL | |
| 0,00 | 0,52 | 0,47 | 0,50 | 0,04 | 0,00 | 0,0000 | 0,00 | 0,00 | 0,52 | 0,000 |
| 0,31 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,00 | 0,04 | 0,0800 | 0,06 | 0,03 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,10 | 0,11 | 0,11 | 0,01 | 0,07 | 0,1032 | 0,09 | 0,02 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,09 | 0,11 | 0,10 | 0,01 | 0,08 | 0,0227 | 0,05 | 0,04 | 0,41 | 11,750 |
| 1,14 | 0,08 | 0,09 | 0,08 | 0,01 | 0,12 | 0,0997 | 0,11 | 0,01 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,01 | 0,15 | 0,1380 | 0,14 | 0,01 | 0,39 | 11,250 |

Tabel LB.59 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan I (pH asli lindi tanpa penambahan NaCl)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,155 | 0,000 | 0,16 | 0,000 |
| 0,31 | 0,088 | 0,047 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,075 | 0,060 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,069 | 0,066 | 0,14 | 0,008 |
| 1,14 | 0,063 | 0,075 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,052 | 0,083 | 0,10 | 0,010 |

Tabel LB.60 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan II (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | |
|------------------|-------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A |
| 0,00 | 0,144 | 0,000 |
| 0,31 | 0,108 | 0,032 |
| 0,57 | 0,072 | 0,062 |
| 0,85 | 0,038 | 0,072 |
| 1,14 | 0,030 | 0,097 |
| 1,33 | 0,026 | 0,103 |

160

Tabel LB.61 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan III (pH Asli Lindi dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | |
|------------------|-------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A |
| 0,00 | 0,150 | 0,000 |
| 0,31 | 0,094 | 0,052 |
| 0,57 | 0,064 | 0,079 |
| 0,85 | 0,035 | 0,103 |
| 1,14 | 0,026 | 0,111 |
| 1,33 | 0,018 | 0,114 |

Tabel LB.62 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan IV(pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,145 | 0,000 | 0,14 | 0,000 |
| 0,31 | 0,087 | 0,027 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,067 | 0,069 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,052 | 0,085 | 0,12 | 0,017 |
| 1,14 | 0,030 | 0,097 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,023 | 0,108 | 0,10 | 0,028 |

Tabel LB.63 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan V (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,147 | 0,000 | 0,15 | 0,000 |
| 0,31 | 0,090 | 0,024 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,068 | 0,058 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,051 | 0,086 | 0,12 | 0,014 |
| 1,14 | 0,038 | 0,098 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,021 | 0,108 | 0,10 | 0,029 |

Tabel LB. 64 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VI (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,148 | 0,000 | 0,15 | 0,000 |
| 0,31 | 0,085 | 0,025 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,070 | 0,070 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,054 | 0,088 | 0,12 | 0,016 |
| 1,14 | 0,041 | 0,096 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,036 | 0,108 | 0,10 | 0,029 |

Tabel LB.65 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VII (pH Awal Proses 5,5 dan Tanpa Penambahan NaCl)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,147 | 0,000 | 0,15 | 0,000 |
| 0,31 | 0,076 | 0,066 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,059 | 0,081 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,027 | 0,110 | 0,12 | 0,013 |
| 1,14 | 0,021 | 0,111 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,014 | 0,115 | 0,10 | 0,031 |

Tabel LB.66 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VIII (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 1 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,147 | 0,000 | 0,15 | 0,000 |
| 0,31 | 0,090 | 0,044 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,066 | 0,066 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,044 | 0,086 | 0,13 | 0,002 |
| 1,14 | 0,027 | 0,100 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,018 | 0,106 | 0,12 | 0,002 |

Tabel LB. 67 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan IX (pH Awal Proses 5,5 dan Penambahan NaCl 2 g L⁻¹)

| Total Fosfat (g) | | | | |
|------------------|-------|------------|---------|------------|
| Energi | LINDI | KONSENTRAT | LINDI | KONSENTRAT |
| (Ah/L) | A | A | KONTROL | |
| 0,00 | 0,149 | 0,000 | 0,15 | 0,000 |
| 0,31 | 0,076 | 0,056 | N/A | N/A |
| 0,57 | 0,059 | 0,072 | N/A | N/A |
| 0,85 | 0,035 | 0,094 | 0,13 | 0,002 |
| 1,14 | 0,023 | 0,106 | N/A | N/A |
| 1,33 | 0,015 | 0,109 | 0,12 | 0,001 |

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06577/KI/IV-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs. TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Aqua
 Test : Total Phosphate
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan keruh
 Sample Accepted : 5 April 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | Phosphat Total, ppm | |
|------|---------------------|-------|
| | Lindi | Aqua |
| 3 | 35,82 | 19,10 |
| 5,5 | 31,30 | 25,10 |
| 8 | 29,52 | 28,23 |
| 10,5 | 27,30 | 32,45 |
| 12 | 23,10 | 37,10 |

Surabaya, 10 April 2017
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 Drs. M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim

Gambar LB. 1 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan I

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06577/KI/IV-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs.TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi - Aqua
 Test : $\text{PO}_4\text{-NH}_4$
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan keruh-jernih
 Sample Accepted : 12 April 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | Lindi | | Aqua | |
|------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | PO_4 ,ppm | NH_4 ,ppm | PO_4 ,ppm | NH_4 ,ppm |
| 0 | 57,68 | 38,60 | 0,11 | 0,06 |
| 3 | 44,05 | | 12,90 | |
| 3,5 | 30,18 | | 25,80 | |
| 8 | 16,05 | | 40,80 | |
| 10,5 | 13,26 | | 42,26 | |
| 12 | 11,44 | | 45,90 | |



Surabaya, 12 April 2017.....
 Head Chemical Laboratory Researcher

 Drs M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar LB. 2 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan II

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06597/KI/IV-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs. TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Aqua
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan kecoklatan-jernih
 Sample Accepted : 19 April 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | PO_4 , ppm | |
|------|--------------|-------|
| | Lindi | Aqua |
| 1. | 59,88 | 0,02 |
| 2. | 38,26 | 21,32 |
| 3. | 26,81 | 32,95 |
| 4. | 15,09 | 43,90 |
| 5. | 11,24 | 48,21 |
| 6. | 8,15 | 50,86 |

Surabaya, 20 April 2017
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 M. Fatoni, M.S.



Gambar LB. 3 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan III

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06582/KI/IV-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs.TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Aqua
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan keoklatan-Jernih
 Sample Accepted : 17 April 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | PO_4 , ppm | | | | | |
|------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Lindi | | | Aqua | | |
| | 1. | 2. | 3. | 1. | 2. | 3. |
| 1. | 58,80 | 59,05 | 57,88 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| 2. | 36,90 | 34,85 | 35,69 | 9,72 | 10,02 | 11,12 |
| 3. | 28,15 | 29,08 | 27,96 | 24,01 | 29,36 | 28,95 |
| 4. | 21,60 | 23,06 | 21,98 | 36,70 | 37,40 | 36,09 |
| 5. | 16,55 | 17,61 | 12,87 | 42,56 | 41,88 | 42,19 |
| 6. | 9,46 | 8,92 | 10,05 | 47,90 | 48,06 | 47,96 |



Surabaya, 19 April 2017
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 Drs M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar LB. 4 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan IV-VI

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06635/KI/V-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs. TI, ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi kontrol
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan kecoklatan
 Sample Accepted : 2 Mei 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | PO_4 , ppm | Kode | PO_4 , ppm |
|------|--------------|------|--------------|
| 1. | 12,56 | 9. | 13,05 |
| 2. | 7,05 | 10. | 6,82 |
| 3. | 44,11 | 11. | 45,10 |
| 4. | 50,05 | 12. | 50,70 |
| 5. | 13,05 | 13. | 13,80 |
| 6. | 5,90 | 14. | 5,47 |
| 7. | 44,58 | 15. | 45,60 |
| 8. | 52,14 | 16. | 53,01 |



Surabaya, 10 Mei 2017
 Head of Chemical Laboratory Researcher

Drs M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar LB. 5 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan Kontrol

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06634/KI/Vi-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs. TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Akudex
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan jernih-Kecoklatan
 Sample Accepted : 2 Mei 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kod e | Lindi | PO_4 , ppm Akudex |
|-------|-------|------------------------|
| 0 | 58,81 | - |
| 3 | 31,10 | 26,80 |
| 5,5 | 24,58 | 33,58 |
| 8 | 11,40 | 46,90 |
| 10,5 | 9,05 | 48,16 |
| 12 | 6,10 | 51,25 |

Surabaya, 10 Mei 2017.
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 Drs M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar LB. 6 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VII

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR

REPORT

Certificate of Analysis

No : 06693/KI/V-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs.TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Akuades
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan jernih-kecoklatan
 Sample Accepted : 26 Mei 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | PO_4 , ppm | |
|------|--------------|---------|
| | Lindi | Akuades |
| 0 | 58,87 | - |
| 3 | 36,80 | 18,15 |
| 5,5 | 27,62 | 27,36 |
| 8 | 18,90 | 36,55 |
| 10,5 | 11,68 | 43,68 |
| 12 | 8,10 | 46,90 |
| K 8 | 53,88 | 0,88 |
| 12 | 52,92 | 0,92 |

Surabaya, 1 Juni 2017.
 Head of Chemical Laboratory Researcher

 Drs. M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim

Gambar LB. 7 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VIII

BALAI PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
LABORATORIUM
PENELITIAN DAN KONSULTASI INDUSTRI
SURABAYA – JAWA TIMUR



REPORT

Certificate of Analysis

No : 06707/KI/VI-2017
 Code : Penelitian
 Sample Sender : Mhs. TL ITS Surabaya
 Sample Name : Lindi-Akuades
 Test : PO_4
 Sample Brand :
 Sample Identity : Cairan jernih-kecoklatan
 Sample Accepted : 2 Juni 2017

Chemical laboratory test result is :

| Kode | PO_4 , ppm | |
|------|--------------|---------|
| | Lindi | Akuades |
| 0 | 59,65 | - |
| 3 | 31,05 | 22,90 |
| 5,5 | 24,56 | 30,04 |
| 8 | 15,02 | 40,01 |
| 10,5 | 9,84 | 45,89 |
| 12 | 6,52 | 48,33 |
| K 8 | 54,01 | 0,69 |
| 12 | 53,81 | 0,52 |



Surabaya, 6 Juni 2017.
 Head of Chemical Laboratory Researcher

Drs M. Fatoni, M.S.

Laboratory Office Jl. Ketintang Baru XVII no 14
 Telp 08155151337, Bank BCA – Bank Jatim
 Surabaya

Gambar LB. 8 Hasil Analisis Total Fosfat Percobaan VIII

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

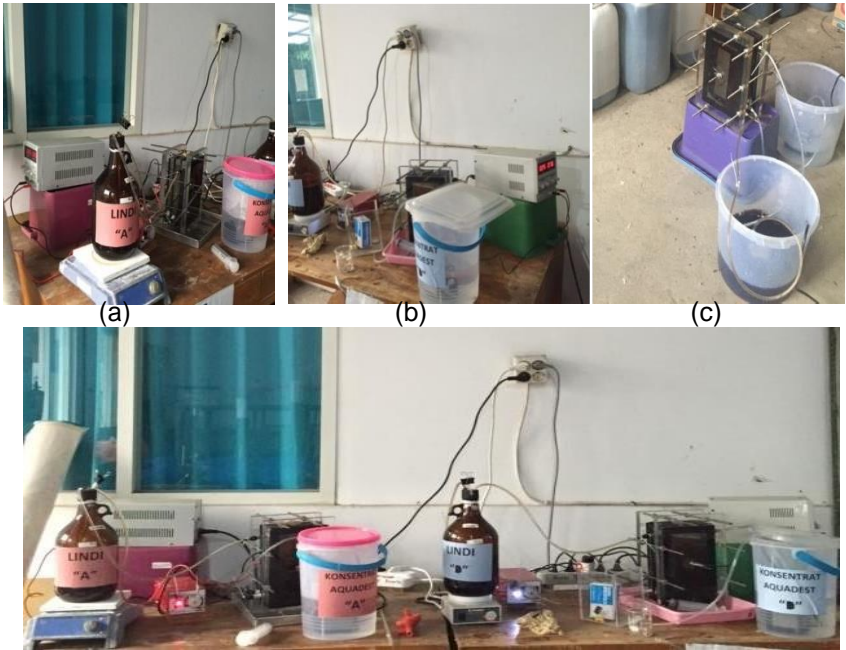
LAMPIRAN C DOKUMENTASI PENELITIAN



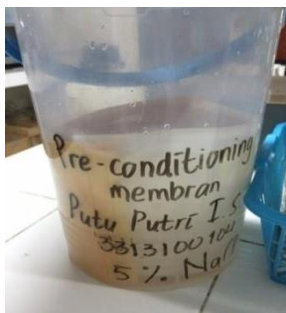
Gambar LC.1 Pengambilan Sampel di TPA Ngipik Gresik



Gambar LC.2 Operasi Reaktor Penelitian Pendahuluan



Gambar LC. 3 Operasi Reaktor Penelitian Utama (a) Reaktor A (b) Reaktor Duplo (c) Reaktor Kontrol



Gambar LC. 4 Pre-conditioning membran



Gambar LC. 5 Pengondisian pH Awal Proses dan Penambahan NaCl



Gambar LC. 6 Pencucian Reaktor serta Kondisi Membran dan Elektroda Setelah Operasi Reaktor

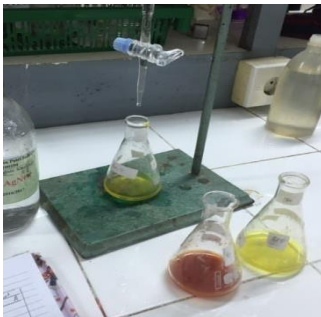


(a)



(b)

Gambar LC. 1(a) Pengukuran pH (b) Pengukuran TDS



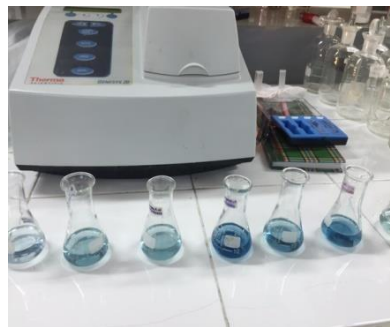
Gambar LC. 8 Analisis Klorida



Gambar LC. 9 Analisis COD



Gambar LC. 10 Analisis Total Klorin



Gambar LC. 11 Analisis Fosfat



Gambar LC. 12 Analisis Ammonium



Gambar LC.13 Analisis BOD



Gambar LC.14 Analisis Total Fosfat



“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BIOGRAFI PENULIS



Putu Putri Indira Sari dilahirkan di Surabaya, Jawa Timur pada tanggal 11 Oktober 1994. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SDK St. Carolus Surabaya, SMPN 1 Surabaya dan SMAN 5 Surabaya. Pada tahun 2013, penulis melanjutkan kuliah di Teknik Lingkungan FTSP Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Penulis pernah aktif sebagai anggota Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan (HMTL) pada tahun 2015-2016 sebagai Ketua Klub Bahasa Inggris dan penampil seni di Tim Pembina Kerohanian Hindu ITS. Penulis juga sempat aktif di kepanitiaan tingkat kampus seperti *ASEAN Youth Collaboration Festival* dan pernah menjadi asisten Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan pada tahun 2017. Penulis pernah mengikuti beberapa pelatihan dan perlombaan yang diselenggarakan di jurusan, institut, regional, nasional dan internasional serta aktif menjadi sukarelawan di program pertukaran pelajar Bina Antarbudaya (AFS) hingga sekarang. Pada Tahun 2016, penulis melaksanakan Kerja Praktik di PT Pertamina RU V Balikpapan dibidang pengolahan limbah cair. Bagi pembaca yang memiliki saran dan kritik maka bisa menghubungi penulis melalui email putrindira10@gmail.com.